

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA – Bejaia

Faculté de technologie.
Département Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Energie Renouvelable En Electrotechnique



Réf :.....

Mémoire de Fin de Cycle
En vue de l'obtention du diplôme

MASTER

Thème

*Etude d'un système de pompage
photovoltaïque*

Présenté par :

ISSAADI Dania & DAIRI Nedjette.

Encadré par :

Mr. K. HAMITOUCHE

Mr. M. LARBAA

Examiner par :

Mm Z. MOKRANI

Mr. S. TARAFT

Année universitaire : 2020/2021.

Remerciements

Nous remercions ALLAH le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail. Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et témoigner notre profonde gratitude à Monsieur Hamitouche Kamel et Larbaa Mohamed docteurs à l'université de Bejaia, qui nous honoré de leur encadrement et qui ont accepté la lourde tâche de promoteurs. Je leur exprime également notre profonde reconnaissance pour leur dévouement d'avoir bien voulu nous faire profiter pleinement de leurs compétences scientifiques et encore des idées par lesquelles ils nous ont orientés pour l'accomplissement de ce travail.

Notre remerciement au département d'électrotechnique et à tous les enseignants qui nous ont enseigné durant les années du cursus. Notre remerciement est également adressé aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail. Enfin nous remercions aussi toutes nos familles et les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à la rédaction de ce travail.

Dédicace

'كن عالما. فإن لم تستطع فكن متعلما، فإن لم تستطع فأحب العلماء، فإن لم تستطع فلا تبغضهم'

Je dédie ce modeste travail :

A ma tendre Mère : Tu représentes pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

A mon très cher Père : Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation le long de ces années.

A mes chers frères : Djebbar, youghorta et Rassem

A mon cher fiancé : Abdellah et tous sa famille

A mes chers oncles, tantes, leurs époux et épouses et à mes chers cousins cousines.

A tous mes amis : Sonia, Célia, Amina, Dilia, Sabrina, fahima, Meriem,

...

A ma chère binôme Nedjette qui a partagé avec moi les moments difficiles de ce travail et sa famille.

A ceux qui m'ont tout donné sans rien en retour que ce travail soit une part de ma reconnaissance envers eux.

DANIA

Dédicaces

Merci mon dieu de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve.

En témoignage d'amour et d'affection je dédie ce modeste travail :

A la prunelle de mes yeux ma maman chérie.

A mon rayon de soleil mon papa adoré.

Sans eux je ne serai pas la personne que je suis aujourd'hui et, ca, grâce à leurs sacrifices et à leurs encouragements .Ils ont toujours été là pour moi, à me pousser à aller de l'avant et à donner le meilleur de moi-même. Ce sont eux mes exemples et mes modèles dans la vie qu'Allah les garde pour moi.

A ma sœur que j'aime tant : Samia.

A mon beau-frère, un frère que j'ai toujours voulu avoir : Fayçal

A mes meilleures amies : Imen et Laiza.

A mon cher collègue Ayadi Houssam que dieu l'accueille dans son vaste paradis.

A la famille saka, oncles et tantes.

A ma chère binôme : Dania Issaadi.

A la promotion énergie renouvelable 2020/2021.

A Mes amis(es) qui m'ont aidé de loin Ou De Près.

Dairi Nedjette.

Sommaire

Sommaire

Liste des figures et tableaux	i
Liste des symboles	v
Liste des abréviations	ix
Introduction générale	1

Chapitre I : Généralités sur le système de pompage photovoltaïque

I. Introduction.....	3
I. 1. Définitions de l'énergie renouvelable	3
I. 2. Energie solaire.....	3
I. 3. Rayonnement solaire.....	4
I.3.1. Rayonnement direct.....	4
I. 3. 2. Rayonnement diffus.....	4
I. 3. 3. Rayonnement réfléchi dû à l'albédo.....	5
I. 3. 4. Rayonnement global.....	5
I.4. Gisement solaire en Algérie.....	5
I.5. les panneaux solaire.....	6
I.5.1. Définition.....	6
I.5.2. Principe de fonctionnement.....	7
I.5.3. Les différents types de cellules solaires.....	8
I.5.3.1. Cellules multi jonction.....	8
I.5.3.2. Cellules mono- cristallines.....	8
I.5.3.3. Cellules poly-cristallines.....	9
I.5.3.4. Cellules silicium amorphe en couche mince.....	10
I.6. Le module et le générateur photovoltaïque.....	11
I.6.1. Implantation du champ de modules.....	11
I.7. Type des systèmes PV.....	12
I.7.1. Systèmes autonomes (off grid).....	12
I.7.1.1. Systèmes autonomes avec stockage.....	12
I.7.1.2. Les systèmes autonomes sans stockage (sans batteries).....	13

I.7.2. Systèmes raccordés au réseau (on grid).....	14
I.7.3. Systèmes hybrides.....	14
I.8. les différents branchements des panneaux PV.....	15
I.8.1. branchement en série.....	15
I.8.2. branchement parallèle.....	16
I.8.3. Association hybride (en série et en parallèle).....	17
I.9. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire.....	18
I.10. La commande MPPT.....	19
I.11. Convertisseur statique.....	19
I.11.1.Hacheur (DC/DC).....	19
I.11.1.1. Principe de fonctionnement.....	19
I.11.1.2. Hacheur série abaisseur (Buck)	19
I.11.1.3.Hacheur parallèle élévateur (BOOST).....	21
I.11.1.4. Hacheur (série-parallèle), type BUCK-BOOST.....	22
I.11.2. Les convertisseur (DC/AC).....	22
I.11.2.1. Les onduleurs.....	22
I.11.2.1.1. Onduleur de tension.....	22
I.11.2.1.2 Onduleur de courant.....	23
I.12. Commande vectorielle de la MSAP.....	23
I.12.1. Modulation de la largeur d'impulsion (MLI).....	23
I.12.2. Commande par hystérésis.....	24
I.13. Groupe moteur-pompe :.....	24
I.13.1. Machine synchrone à aimants permanents (MSAP).....	24
I.13.1.1. Principe de fonctionnement de la MSAP.....	25
I.13.1.2. Constitution de la machine synchrone à aimants permanents.....	25
I.13.1.3. Avantages et inconvénients de la MSAP.....	26
I.13.1.4. Les Domaines d'application de MSAP.....	26
I.14. la pompe.....	27
I.14.1. Les types de pompes.....	27
I.14.1.1. Pompe centrifuge.....	27

I.14.1.1.1. Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge.....	27
I.14.1.1.2. Constitution de la pompe centrifuge.....	28
I.14.1.1.3. Caractéristiques d'une pompe centrifuge.....	28
I.14.1.1.4. Les avantages et les inconvénients des Pompes centrifuges.....	29
I.14.1.2. Les pompes volumétriques.....	29
I.14.1.2.1.Principe de fonctionnement.....	30
I.14.1.2.2. Caractéristiques des pompes volumétriques.....	30
Conclusion.....	31

Chapitre II : Modélisation des éléments du système photovoltaïque

II. Introduction.....	32
II.1. Modélisation du générateur photovoltaïque	32
II.1.1. Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	32
II.1.1.1. Cellule photovoltaïque idéal.....	32
II.1.1.2. Cellule photovoltaïque réelle.....	33
II.1.2. Panneau photovoltaïque.....	34
II.1.2.1. Caractéristique tension-courant d'un GPV.....	35
II.1.2.2. Caractéristique puissance-courant d'un GPV.....	35
II.1.2.3. Effet de l'éclairement.....	36
II.1.2.4. Effet de la température.....	37
II.2. Optimisation de la puissance des modules PV (contrôle MPPT).....	39
II.2.1. La méthode de perturbation et observation (P&O).....	40
II.3. Modélisation du hacheur.....	41
II.4. Application et simulation de la méthode perturbation et observation (P&O) sur un panneau photovoltaïque	43
Conclusion.....	46

Chapitre III : modélisation de la machine synchrone à aimant permanent

III. Introduction.....	47
------------------------	----

III.1.Machine synchrone à aimant permanent.....	47
III.1.1.Principe de fonctionnement de la MSAP.....	47
III.1.2.La modélisation de la MSAP.....	47
III.1.2.1. Equations éclectiques et magnétiques de la machine.....	48
III.1.2.1.1. Equations éclectique.....	48
III.1.2.1.2. Equations magnétique.....	48
III.1.2.1.3. Equations mécanique.....	49
III.1.2.1.4. Couple électromagnétique.....	50
III.1.2.1.5. Ecriture des équations électriques et magnétiques dans le repère de Park	50
III.2.Convertisseur statique	51
III. 2. 1. Modélisation d'onduleur de tension.....	51
III. 3. Principe de la commande vectorielle.....	53
III. 4. Régulateur PID	54
III. 5. Simulation de la machine synchrone à aimant permanent avec une commande vectoriel.....	54
Conclusion.....	58

Chapitre IV : Dimensionnement du système de pompage photovoltaïque

IV. Introduction.....	59
IV.1.Pompe centrifuge.....	59
IV.1.2.Modélisation de la pompe centrifuge.....	59
IV.1.2.1. Les pertes de charge.....	60
IV.1.2.1.1. Les pertes de charge linéaires.....	60
IV.1.2.1.2. Les pertes de charge singulières.....	60
IV.1.2.1.3.Couple résistant.....	61
IV.2. Dimensionnement du système de pompage photovoltaïque	61
IV.2. 1. Données de base.....	61
IV. 2. 1. 1. Débit.....	61
IV.2. 1. 2. Hauteur manométrique totale.....	61

IV. 2. 1. 3. Niveau statique.....	61
IV. 2. 1. 4. Niveau dynamique.....	62
IV. 2. 2. Méthode de dimensionnement.....	62
IV. 2. 2. 1. Evaluation des besoins en eau.....	62
IV. 2. 2. 2. La puissance hydraulique.....	63
IV. 2. 2. 3. La puissance utile de moteur.....	63
IV. 2. 2. 4. La puissance absorbée.....	63
IV. 2. 2. 5. La puissance demandée.....	63
IV. 2. 2. 6. La puissance du générateur photovoltaïque P_{GPV}	65
IV. 2. 2. 7. Le nombre de panneaux.....	63
IV. 2. 2. 7. 1. Le nombre de panneaux en série.....	63
IV. 2. 2. 7. 2. Le nombre de branches.....	64
IV. 2. 3. Application numérique au dimensionnement.....	64
IV. 3. Simulation de système pompage photovoltaïque.....	66
Conclusion.....	70
Conclusion générale.....	71
Bibliographie.....	72
Annexe.....	73

Liste des figures et tableaux

Liste des figures et tableaux**Chapitre I : Généralités sur le système de pompage photovoltaïque**

Figure I.1 : le soleil source de l'énergie solaire.....	4
Figure I.2 : types de rayonnements solaires reçus au sol	5
Figure I.3 : Montre l'irradiation globale moyenne annuelle reçue sur plan incliné à la latitude du lieu.....	6
Figure I.4 : constitution d'une cellule photovoltaïque en silicium.....	8
Figure I.5 : Cellules mono- cristallines.....	9
Figure I.6 : Cellules poly-cristallines.....	10
Figure I.7 : Cellules silicium amorphe en couche mince	11
Figure I.8 : De la cellule au générateur photovoltaïque	11
Figure I.9 : Système PV autonome avec batteries.....	13
Figure I.10 : Système PV autonome sans batteries.....	13
Figure I.11 : système PV raccorde au réseau sans batterie.....	14
Figure I.12 : Système PV Hybride.....	15
Figure I.13 : Caractéristiques résultantes d'une association de NS cellules en série.....	16
Figure I.14 : branchement en série des panneaux PV.....	16
Figure I.15 : Caractéristiques résultantes d'une association de N_p cellules en parallèle.....	17
Figure I.16 : branchement parallèle des panneaux PV.....	17
Figure I.17 : schéma d'un convertisseur Buck	20
Figure I.18 : schéma équivalent lorsque K1 est fermé.....	20
Figure I.19 : Schéma équivalent lorsque K1 est ouvert.....	20
Figure I.20 : schéma d'un convertisseur BOOST.....	21
Figure I.21 : schéma équivalent lorsque S=1.....	21
Figure I.22 : schéma équivalent lorsque S=0.....	22
Figure I.23 : Schéma d'un onduleur de tension.....	23
Figure I.24 : Structure de moteur synchrone à aimants permanents.....	24

Figure I.25 : Stator et rotor de la machine synchrone à aimant permanent.....25

Figure I.26 : Pompe centrifuge..... 28

Figure I.27 : Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge.....29

Figure I.28 : Pompe volumétrique.....30

Figure I.29 : Caractéristiques d'une pompe volumétrique.....31

Chapitre II : Modélisation des éléments du système PV

Figure II.1 : Schéma d'une cellule photovoltaïque idéale.....32

Figure II.2 : Schéma équivalent de cellule PV réelle.....33

Figure II.3 : Schéma de générateur PV en MATLAB/SIMULINK.....35

Figure II.4 : Caractéristique I(V) d'un GPV dans les conditions standards.....35

Figure II.5 : Caractéristique P(V) d'un GPV dans les conditions standards.....36

Figure II.6 : influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I_{pv}=f(V_{pv})$36

Figure II.7 : influence de l'éclairement sur les caractéristiques $P_{pv}=f(V_{pv})$37

Figure II.8 : influence de la température sur les caractéristiques $I_{pv}=f(I_{pv})$38

Figure II.9 : influence de la température sur les caractéristiques $P_{pv}=f(I_{pv})$38

Figure II.10 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque contrôlée par une MPPT...40

Figure II.11 : Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau solaire.....40

Figure II.12 : diagramme fonctionnel algorithme « perturbation et observation ».....41

Figure II.13 : Circuit électrique du convertisseur DC-DC (BOOST).....42

Figure II.14 : Schéma d'un système photovoltaïque en MATLAB/SIMULINK43

Figure II.15 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv}= f(V_{pv})$ avec optimisation par la PO.....44

Figure II.16 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv}= f(V_{pv})$ avec optimisation par la PO.....44

Figure II.17 : Allure de la tension du PV sous les conditions ($1000W/m^2$, $T_a=25^{\circ}C$).....45

Figure II.18 : Allure de la puissance du PV sous les conditions ($1000W/m^2$, $T_a=25^{\circ}C$).....45

Chapitre III : Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent

Figure.III.1 : schéma représentatif de la MSAP a modélisé.....	47
Figure III.2 : schéma équivalent de la MSAP du repère (d,q).....	50
Figure III.3 : Schéma d'un onduleur de tension alimentant le stator d'un moteur synchrone.....	52
Figure III.4 : Schéma bloc de la commande vectorielle de la machine synchrone à aimant permanent	55
Figure III.5 : L'allure de la vitesse de rotation et de référence en fonction du temps.....	55
Figure III.6 : couple électromagnétique en fonction du temps.....	56
Figure III.7 : courants statoriques en fonction de temps.....	56
Figure III.8 : courant quadrature en fonction du temps.....	57
Figure III.9 : courant direct en fonction du temps.....	57

Chapitre IV : Dimensionnement du système de pompage photovoltaïque

Figure IV.1 : les données de base d'une pompe.....	62
Figure IV.2 : Schéma bloc global de système pompage photovoltaïque.....	65
Figure VI.3 : L'évolution de la température de jonction en fonction du temps.....	65
Figure IV.4 : L'évolution du L'ensoleillement en fonction du temps.....	66
Figure IV.5 : L'évolution de la vitesse de rotation et de référencé en fonction du temps.....	66
Figure IV.6 : L'évolution de la puissance photovoltaïque en fonction du temps.....	67
Figure IV.7 : L'évolution du débit en fonction du temps.....	67
Figure IV.8 : L'évolution du couple électromagnétique et le couple résistant en fonction du temps.....	68
Figure IV.9 : L'évolution des courants statorique en fonction du temps.....	68
Figure IV.10 :L'évolution de débit en fonction de vitesse rotorique.....	69

Liste des tableaux

Tableau II : caractéristiques de panneau.....	34
--	----

Liste des symboles

Liste des symboles

P_{pv} : Puissance photovoltaïque (W).

I_{mpp} : Courant maximum au PPM (A).

V_{mpp} : Tension maximum au PPM (V).

I_{cc} : Courant de court-circuit (A).

V_{co} : Tension de circuit ouvert (V).

V_{dc} : La tension continue à l'entrée de l'onduleur (V).

V_i : La tension d'une cellule.

P_{mpp} : Puissance maximale (W).

α_{sc} : Coefficient de la température de court-circuit (A/°K).

$e(t)$: Signal de commande.

K_p : Gain Proportionnel.

K_i : Gain Intégral.

K_d : Gain Dérivée.

β_{oc} : Coefficient de tension (V/°K).

V_e : tension d'entrée.

V_s : tension de sortie.

D : le rapport cyclique du convertisseur.

I_o : Courant de saturation de la diode.

V_d : Tension à la borne de la diode.

$V_t : \frac{KT}{q}$ Potentiel thermique.

K : constante de Boltzmann.

Q : charge d'électrons.

T : température de la cellule en kelvin.

T_a : La température ambiante.

I_{ph} : Courant photonique.

N_p : Le nombre total de panneaux photovoltaïque.

N_{ps} : Le nombre de panneaux en série.

$N_{branches}$: Le nombre de branche.

n_p : Le nombre de cellules en parallèles.

n_s : Nombre de cellule en série.

P_{pvt} : La puissance de générateur photovoltaïque.

φ_{aa} : Flux propre de la phase a.

L_s : Inductance propre statorique.

M_s : Inductances mutuelles entre deux phases du stator.

L_c : Inductance cyclique.

d, q : Indice de l'axe direct et en quadrature du repaire de Park.

R_s : Résistance de l'enroulement statorique.

$[v_s]$: Vecteur tensions statoriques.

$[i_s]$: Vecteur courants statorique.

$[\varphi_s]$: Vecteur flux statoriques.

$[L]$: représente la matrice des inductances statoriques.

$[R_s]$: représente la matrice des résistances statoriques.

ω_r : Vitesse angulaire électrique de rotation du rotor $[\text{rad/s}]$.

ω_s : Pulsations des courants statoriques $[\text{rad/s}]$.

ω : Vitesse angulaire de la machine $[\text{rad/s}]$.

Δp : Variation de puissance entre deux points de fonctionnement.

ΔV : Variation de la tension entre deux points de fonctionnement.

C_{em} : Couple électromagnétique.

C_r : Couple résistant [N.m].

J : Moment d'inertie de la partie tournante.

Ω : vitesse angulaire mécanique du rotor.

F : Coefficient de frottement visqueux.

H : Hauteur totale du pompage.

H_s : Hauteur statique qui est la distance entre le niveau statique de l'eau dans le puits jusqu'au le point le plus élevées auquel on doit pomper l'eau.

H_d : Est la somme des pertes linéaires et singulières.

λ : Coefficient de pertes de charges linéaires.

L : Longueur de la tuyauterie (m).

D : Diamètre de la tuyauterie (m).

G : Accélération de la pesanteur (m/s^2).

v : Vitesse moyenne du fluide (m/s).

Q : Débit d'eau [m^3/s].

ε : Coefficient de pertes de charges locales.

K_{fr} : Constante de la canalisation.

P_{HYD} : Énergie hydraulique (W).

HMT : La hauteur manométrique totale[m].

ρ : Densité de l'eau ($1000 \text{ kg}/m^3$).

g : accélération de la pesanteur [$9.81 \text{ m}/s^2$].

$P_{méc}$: La puissance mécanique (W).

$P_{élé}$: La puissance électrique (W).

P_{dem} : La puissance à l'entrée de l'onduleur (W).

P_a : La puissance absorbée (W).

P_u : La puissance électrique du moteur (W).

η_m : Le rendement de MSAP.

η_{ond} : Le rendement d'onduleur.

η_P : Le rendement de la pompe centrifuge.

Liste des abréviations

Liste des abréviations

AC : courant alternative.

DC : courant direct.

GPV : Générateur photovoltaïque.

MSAP : Machine synchrone à aimant permanent.

MLI : Modulation de largeur d'impulsions.

MPP : Power point Maximum.

P&O : perturbation et observation.

PV : Photovoltaïque.

STC : standard test conduction.

HMT : hauteur manométrique total.

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE :

Dans nos jours, il nous semble que personne ne peut s'en douter sur l'importance de l'eau et de l'énergie pour les besoins humains. Avec les avancées technologiques, le besoin en énergie ne cesse d'augmenter. Ce problème d'énergie est encore plus sensible dans les sites isolés où l'utilisation des ressources classiques s'avère souvent très coûteuse. En effet, plusieurs contraintes, comme le transport du combustible et les entretiens périodiques des moteurs diesels, rendent la recherche d'une source d'énergie alternative indispensable pour ce type de sites [1].

Comme nous le savons, la plus grande partie de l'énergie consommée actuellement provient de l'utilisation des combustibles fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou encore l'énergie nucléaire. Les études et les prévisions récentes nous alertent que l'utilisation massive de ces ressources conduira certainement à l'épuisement total de ces réserves. En plus, tout le monde est mondialement convaincu par le danger de ce processus sur l'environnement.

A partir de ce constat, il est nécessaire de chercher d'autres ressources d'énergie de remplacement. Les énergies renouvelables, comme l'énergie photovoltaïque, éolienne ou hydraulique, représentent une solution de remplacement par excellence et elles sont de plus en plus utilisées dans nos jours. Ce type d'énergie n'est pas seulement gratuit et inépuisable, mais aussi très propre pour l'environnement. D'ailleurs, on parle souvent d'une énergie « verte », puisqu'elle permet d'éviter totalement la pollution produite par les sources traditionnelles [2].

L'une des applications les plus importantes de l'énergie solaire photovoltaïque(PV) est le pompage de l'eau, en particulier dans les zones rurales qui ont une quantité considérable de rayonnement solaire et n'ont pas accès aux réseaux électrique. Les systèmes PV de pompage utilisent généralement des pompes de faible puissance allant de 200-2000 W. Ils sont largement utilisés pour l'approvisionnement en eau potable pour les ménages, l'apport en eau pour les bétails et l'irrigation à petite échelle.

Un système de pompage d'eau photovoltaïque est généralement alimenté par un système comprenant un générateur photovoltaïque, un groupe moteur-pompe et un réservoir d'eau pour assurer la continuité de l'approvisionnement lorsque l'énergie solaire ne suffit pas [3].

Actuellement, deux systèmes de pompage photovoltaïque sont utilisés, avec et sans batteries. Mais le système qu'on a choisi est au fil du soleil ce procédé consiste à pomper l'eau tant que le soleil est présent vers un réservoir qui assure la régulation de la consommation. Ainsi, le consommateur peut être alimenté même la nuit et pendant les journées nuageuses.

Des nombreux types de moteurs sont disponibles pour une utilisation dans les systèmes de pompage photovoltaïque. Au début, les moteurs à courant continu à balais étaient largement utilisés pour entraîner les pompes à eau et continuent à être utilisés. Après cela, il s'est avéré que la fiabilité des systèmes de pompage photovoltaïque pouvait être améliorée en utilisant des moteurs à courant continu sans balais et des moteurs à réluctance commutée.

Pour une puissance élevée avec une haute fiabilité, les moteurs synchrones à aimant permanent semblent être l'alternative adéquate par rapport aux moteurs cités précédemment.

Plusieurs méthodes MPPT ont été développées pour des systèmes PV autonomes ou connectés au réseau. Cependant, il existe peu d'articles publiés traitant de l'application des MPPT pour les systèmes de pompage photovoltaïque. Les chercheurs ont été mis sur les méthodes MPPT Perturb and Observe (P&O) et Incrémental Conductance (IC). Ces méthodes sont connues pour être les techniques MPPT de perturbation qui partagent le même principe dans lequel la valeur du paramètre de fonctionnement, tel que la tension, le courant ou le rapport cyclique, varie en permanence avec une taille de pas prédéfinie pour se rapprocher du MPP. Cette augmentation ou cette diminution permet de converger vers le MPP. Ces techniques sont robustes mais introduisent des oscillations autour du MPP qui se traduisent par un gaspillage d'énergie [4].

Une application de l'algorithme MPPT basé sur Golden Section Search dans les systèmes de pompage photovoltaïque a proposé pour ce travail. Elle sera comparée au P&O conventionnel en termes de l'efficacité pour le suivi du point de puissance maximale dans des conditions climatiques variables et sa simplicité. Elle sera également comparée en termes de gaspillage d'énergie en régime permanent.

Dans notre étude nous sommes intéressés à l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale pour obtenir un algorithme qui donne une bonne qualité d'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque, de ce fait, le présent mémoire est subdivisé en quatre chapitres dont le contenu est succinctement résumé ci-dessous :

- Le premier chapitre donne une description générale des systèmes photovoltaïques, ainsi que des notions sur les différents systèmes PV et sur les différentes parties constituant notre système de pompage
- Le deuxième chapitre est réservé à la modélisation mathématique et la simulation d'un système photovoltaïque.
- Le troisième chapitre est réservé à la modélisation mathématique et la simulation de la machine synchrone à aimant permanent avec la commande vectorielle.
- Le quatrième chapitre présentera la modélisation de la pompe centrifuge et une simple méthode de dimensionnement de système de pompage photovoltaïque puis la simulation de la chaîne globale de ce système.

Finalement, nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur le système de pompage photovoltaïque

I. Introduction :

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, elle pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie [5]. Avec les besoins des stations de pompage soit pour distribuer des carburants ou l'eau dans les cites isolées qui sont des problèmes bien réelles poussent les chercheurs à développer des systèmes de pompage autonomes bien contrôlés à base des sources d'énergie durables et plus respectueuses de l'environnement. Parmi ces systèmes on trouve système pompage photovoltaïque qui occupe une bonne place grâce aux avantages qu'elle apporte par rapport aux autres [6].

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'architecture complète d'un système de pompage photovoltaïque autonome. Ensuite, nous présentons d'une façon descriptive plus détaillée les principaux composants de notre système constitués par les éléments : panneaux photovoltaïques (PV) ; machine synchrone (MSAP) ; hacheur BOOST ; onduleur et la pompe centrifuge.

I.1. Définitions de l'énergie renouvelable :

Les énergies renouvelables, dites aussi énergies vertes, sont les sources d'énergies d'origine Naturelle [7]. Elles peuvent ainsi être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain.

Exemple :

- Vent : éolienne
- Soleil : thermique, photovoltaïque, thermodynamique.
- Chaleur terrestre : géothermie.
- Eau : hydroélectrique, marémotrice.
- Biodégradation : biomasse.
- Biocarburant.

I.2. L'énergie solaire :

L'énergie solaire vient de la fusion nucléaire qui se produit au centre du soleil. Elle se propage dans le système solaire et dans l'univers essentiellement sous forme d'un rayonnement électromagnétique de photons et de rayonnement infrarouge. L'énergie solaire reçue en un point du globe dépend de : La latitude, la saison et l'heure, qui influent sur la hauteur du soleil et donc sur l'énergie reçue au sol par unité de surface, ainsi que sur la nébulosité en fonction du climat local.

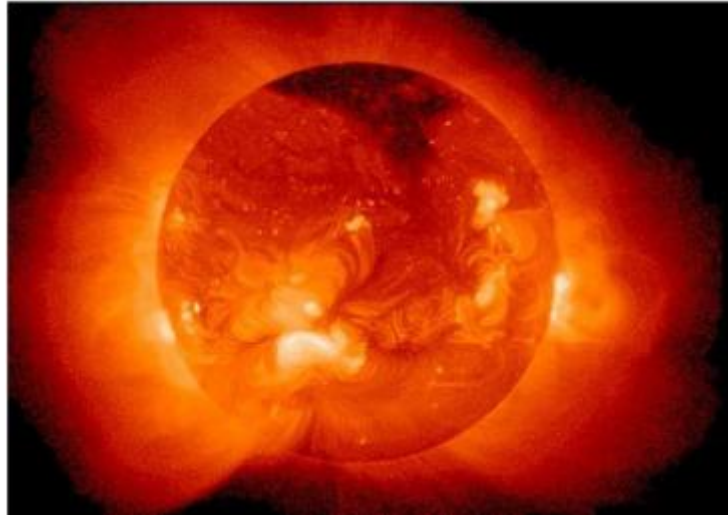


Figure I.1 : le soleil source de l'énergie solaire

La distance de la terre au soleil est d'environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/h, les rayons du soleil mettent donc environ 8 minutes à nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise égale à $1360W/m^2$.

Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduite à $1000W/m^2$ à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein a découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que ses énergies portées par des particules, les photons [8].

I.3. Rayonnement solaire :

Au niveau du sol le rayonnement solaire peut être absorbé et diffusé, pour cela distingue plusieurs composants.

I.3.1. Le rayonnement direct :

Le rayonnement direct est défini comme étant le rayonnement provenant au sol sous un angle solide limité au seul disque solaire sans aucun intermédiaire et reçu sur une surface normale à l'axe de cet angle solide.

I.3.2. Rayonnement diffus :

Le rayonnement diffus, issu du ciel, à l'exception du disque solaire et du sol, est beaucoup plus difficile à analyser. Tout d'abord, le sol réfléchit en moyenne le tiers du rayonnement qu'il reçoit et il faut tenir compte également de la diffusion de ce rayonnement réfléchi [7].

I.3.3. Le rayonnement réfléchi dû à l'albédo :

Qui résulte de la réflexion du rayonnement par les surfaces proches. L'albédo d'un milieu considéré est le rapport entre le flux de rayonnement réfléchi et le flux de rayonnement incident. Ce coefficient est d'autant plus élevé que la surface est claire (étendue d'eau, neige...) [9].

I.3.4. Le rayonnement global :

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol). Dans la figure ci-dessous est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçus sur une surface terrestre.

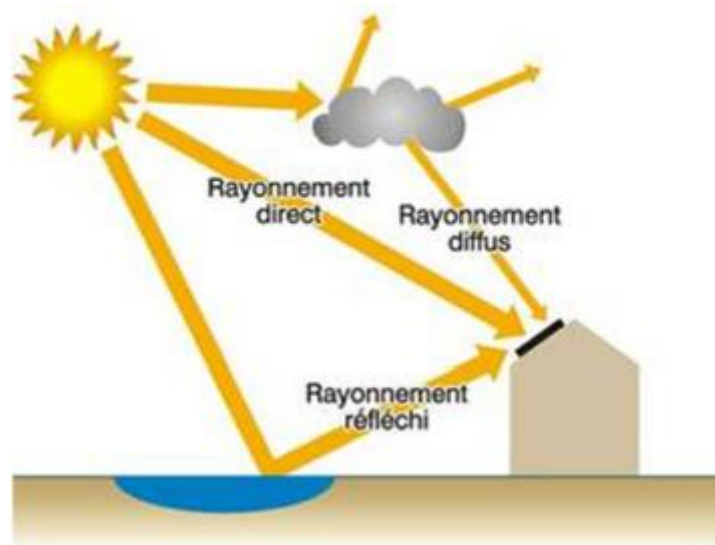


Figure I.2 : types de rayonnements solaires reçus au sol [10]

I.4. Gisement solaire en Algérie :

L'étude du gisement solaire est le point de départ de toute investigation dans le domaine de l'énergie solaire. Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible dans un site donné et au cours d'une période donnée. Son évaluation peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale. [11] Pour effectuer le dimensionnement le plus exact possible, compte tenu des demandes en énergie à satisfaire, l'étude du gisement est le point de départ de toute investigation.

La connaissance du gisement solaire d'une région est précise selon :

- la densité des stations pour lesquelles on a des données,
- le nombre d'années de mesures disponibles,
- le pas de temps des données (mois, jour, heure),
- la durée d'ensoleillement,
- l'albédo du sol ... [12]

L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation moyenne nationale dépasse les 2000 heures annuellement. Cette valeur peut

atteindre facilement les 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara. Ainsi, l'énergie moyenne reçue quotidiennement sur une surface inclinée à la latitude est d'environ $7\text{kWh}/\text{m}^2/\text{jour}$. Elle est répartie comme suit : [11]

- Au Nord : $5,6\text{kWh}/\text{m}^2/\text{jour}$.
- Au Sud : $7,2\text{kWh}/\text{m}^2/\text{jour}$

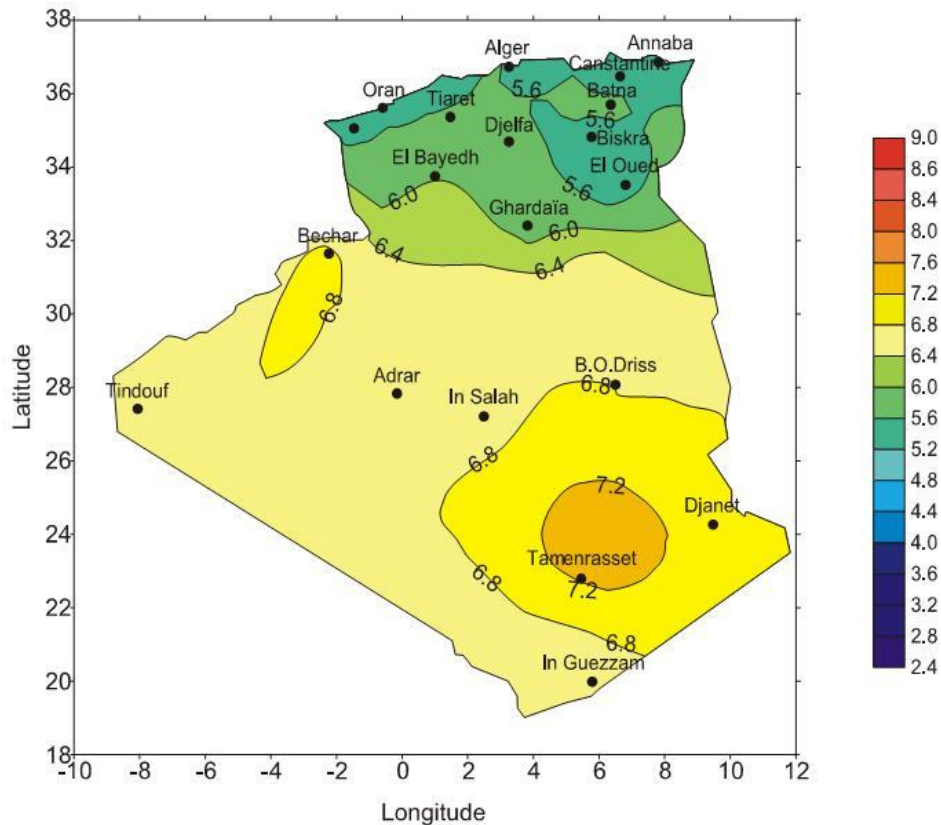


Figure I.3 : Montre l'irradiation globale moyenne annuelle reçue sur plan incliné à la latitude du lieu [13]

I.5. les panneaux solaire :

I.5.1. Définition :

Le panneau solaire photovoltaïque est composé de modules interconnectés en série ou en parallèles pour une production d'énergie électrique. Le tout est porté sur un support métallique.

La meilleure inclinaison des panneaux solaire PV pour un usage à longueur d'année est celle de la latitude de l'endroit où son installé. Toutefois, ce sont souvent les dispositions constructives de l'habitation qui déterminent l'inclinaison [14].

La cellule photovoltaïque ou encore photopile est l'élément constitutif des modules photovoltaïques. Un panneau photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules en série ou en parallèle afin d'obtenir une tension souhaitée. La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique [15].

I.5.2. Principe de fonctionnement :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Entre les deux zones se développe une jonction PN avec une barrière de potentiel.

Lorsque ce matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière ; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés/décrochés". Mais une partie de ces électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "décrochés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : C'est l'effet photovoltaïque. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode (contact avant) et surtout de collecteurs d'électrons, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode. La figure I.4 illustre la constitution d'une cellule photovoltaïque en silicium.

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux électrons par collision. Si l'énergie transmise est supérieure à celle associée à la bande interdite (E_g) du semi-conducteur, des paires électrons-trous sont alors créées dans cette zone de déplétion par arrachement des électrons. Sous l'effet d'un champ électrique E qui règne dans cette zone, ces porteurs libres sont drainés vers les contacts métalliques des régions P et N. Il en résulte alors un courant électrique dans la cellule PV et une différence de potentiel (de 0.6 à 0.8 Volt) supportée entre les électrodes métalliques de la cellule, communément nommée tension de circuit ouvert (V_{co}) fortement dépendante de la température. Le courant maximal PV se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées [16].

On parle alors de courant de court-circuit (I_{cc}) dépendant fortement du niveau d'éclairement.

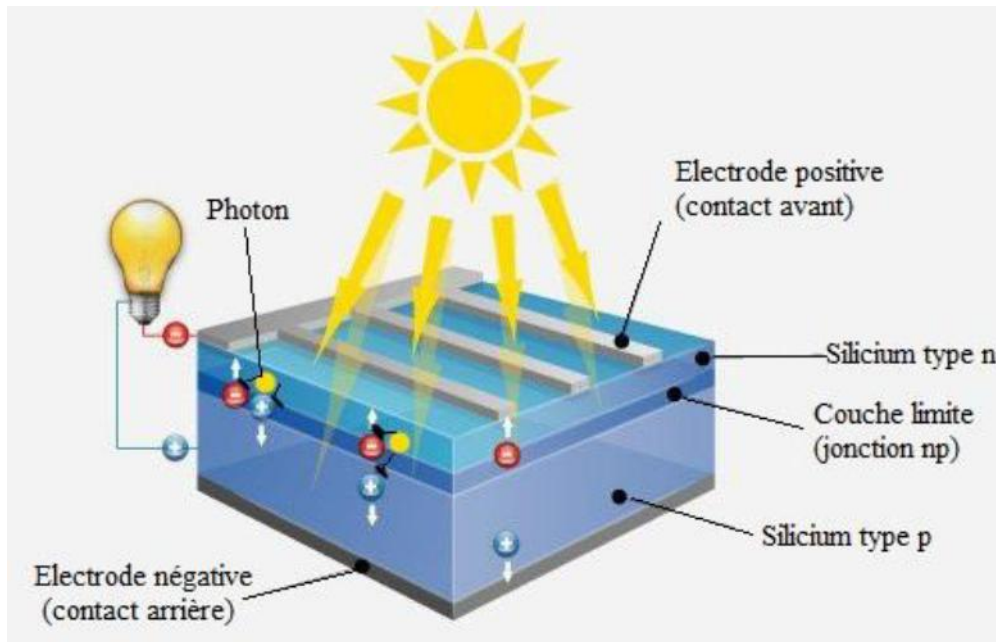


Figure I.4 : constitution d'une cellule photovoltaïque en silicium [17]

I.5.3. Les différents types de cellules solaires :

On distingue cinq principaux types de cellules solaires : les cellules multi jonction, les cellules en silicium monocristallin, les cellules en silicium poly cristallin, les cellules sans silicium en couche mince CIS, les cellules silicium amorphe en couche mince. Et chaque type de cellules à un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible : de 5 à 22% de l'énergie qu'elles reçoivent.

I.5.3.1. Cellules multi jonction :

Les cellules multi jonction sont composées de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion. Ces cellules ont un avantage inégalé mais malheureusement elles n'ont pas connu d'application commerciale.

I.5.3.2. Cellules mono- cristallines :

La cellule monocristalline qui s'approche le plus du modèle théorique : cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 15 à 22 %.

A. Avantage :

- Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de très bon rendement de l'ordre de 15 à 22 % (soit environ 150 Wc/m^2) ;
- Elles ont une durée de vie importante (environ 30 ans) ;

B. Inconvénients :

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc très chère ;

- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur ;
- Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée (jusqu'à 7 ans).
- Rendement faible sous un faible éclairement [16]



Figure I.5 : Cellules mono- cristallines [18]

I.5.3.3. Cellules poly-cristallines :

Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

A. Avantages :

- Coût de production moins élevé ;
- nécessite moins d'énergie ;
- bon rendement : 13 à 20 % au laboratoire ;
- Durée de vie importante (environ 30 ans) ;
- Meilleur marché que le monocristallin [16] ;

B. Inconvénients :

- Rendement faible sous un faible éclairement [16] ;

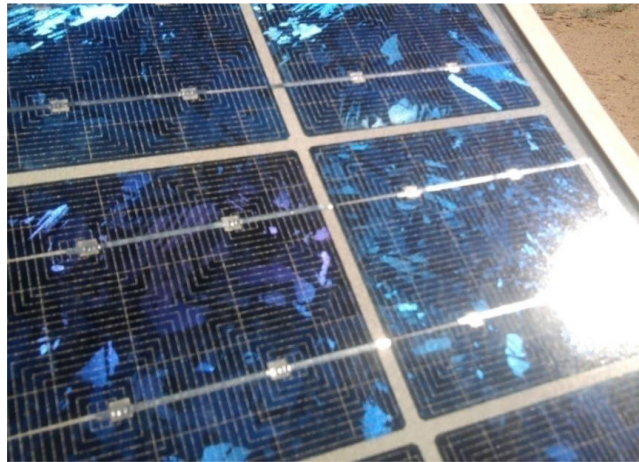


Figure I.6 : Cellules poly-cristallines [17]

I.5.3.4. Cellules silicium amorphe en couche mince :

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé ou marron. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites solaires. Le silicium amorphe est apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin. Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques.

A. Avantages :

- Coût de production bien plus bas ;
- Fonctionnement sous très faible éclairément ;
- Bon marché par rapport aux autres types de cellules ;
- Moins sensibles aux températures élevées ;
- Rendement de 5 % par module et de 14 % au laboratoire [16] ;

B. Inconvénients :

- Rendement bien inférieur à celui de silicium cristallin (entre 5% et 7% dans le commerce) ;
- Industrialisation encore peut développer par rapport aux technologies cristallines ;
- Baisse de rendement dès les premières semaines d'exposition ;



Figure I.7 : Cellules silicium amorphe en couche mince [18]

Les cellules photovoltaïques les plus utilisées sont les cellules à base de silicium, les autres types étant encore soit en phase de recherche/développement, soit trop chers et réservés à des usages où leur prix n'est pas un obstacle. Par conséquent, dans notre étude, nous avons choisi la technologie de cellule en silicium poly cristallin [16].

I.6. Le module et le générateur photovoltaïque :

Un module photovoltaïque est le plus petit ensemble de cellules solaires interconnectées et complètement protégées contre l'environnement. Généralement il contient également des protections pour protéger les cellules photovoltaïques d'un fonctionnement qui peut être destructif. Le générateur photovoltaïque c'est un regroupement de modules solaires photovoltaïques raccordés entre-deux et destiné à produire de l'électricité, soit à titre autonome (panneaux solaires sur les toits des habitations par exemple), soit dans le cadre d'un raccordement à un réseau public de distribution d'électricité.

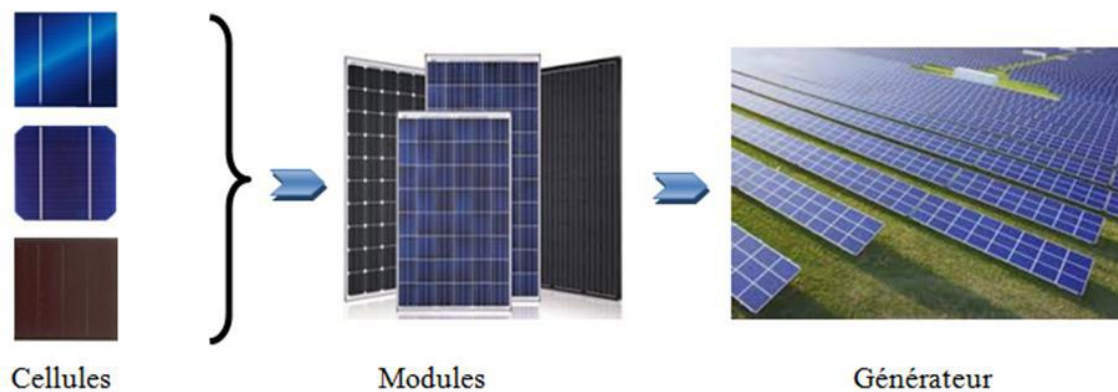


Figure I.8 : De la cellule au générateur photovoltaïque [19]

I.6.1. Implantation du champ de modules :

Pour choisir l'implantation du panneau solaire, quatre éléments sont à considérer :

- L'orientation du champ de modules : favoriser au maximum une orientation sud dans l'hémisphère Nord.
- L'inclinaison des modules : L'inclinaison des : l'inclinaison optimale est généralement celle qui permet d'optimiser la production des panneaux solaires pendant le mois le moins ensoleillé. Pour les régions tempérées où l'hiver est la plus mauvaise période l'inclinaison choisie est souvent la latitude plus 10°.
- L'ombre portée sur le champ de modules : un relevé de profils d'ombre sur le site est primordial au démarrage du projet afin de contrôler la qualité de l'ensoleillement.
- La distance module – batteries : En courant continu basse tension, les chutes de tension peuvent être importantes. Une distance importante entre les modules et la batterie peut rendre nécessaire la pose de câble de sections importantes (10 ou 16 mm² voire plus). Il faut donc limiter au maximum la distance entre le champ de modules et les usages en courant continu [20].

I.7. Type des systèmes PV :

Les systèmes PV sont classés en fonction de trois types autonomes, hybrides et reliés au réseau. Le type que vous choisirez dépendra de vos besoins, de votre emplacement et de votre budget.

I.7.1.Systèmes autonomes (off grid) :

Ils sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries d'accumulateurs pour stocker l'énergie. De tels systèmes sont particulièrement utiles et rentables dans les applications estivales, lorsque l'accès à un endroit est difficile ou coûteux ou lorsque les besoins en entretien doivent être réduits au minimum.

On peut classifier ce type en deux modes :

- a- Autonome avec batteries (stockage) pour les systèmes autonomes qui nécessitent une continuité de service durant toute la nuit ou quelques heures de la nuit.
- b- Autonome sans batteries (au file de soleil) destiné pour le pompage photovoltaïque [19].

I.7.1.1.Systèmes autonomes avec stockage :

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes, elle comporte des batteries qui emmagasinent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque au cours de la journée (figure I.9). Donc, le stockage électrochimique dans les batteries est indispensable pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques [21].



Figure I.9 : Système PV autonome avec batteries [19]

I.7.1.2. Les systèmes autonomes sans stockage (sans batteries) :

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairage solaire suffisant pour son démarrage (figure I.10). C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de l'éclairage solaire. Mais il faut bien dimensionner le générateur photovoltaïque de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil à l'éclairage le plus faible. Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de systèmes autonomes où le stockage de l'eau dans un réservoir est généralement le plus adopté par rapport au stockage électrochimique [21].

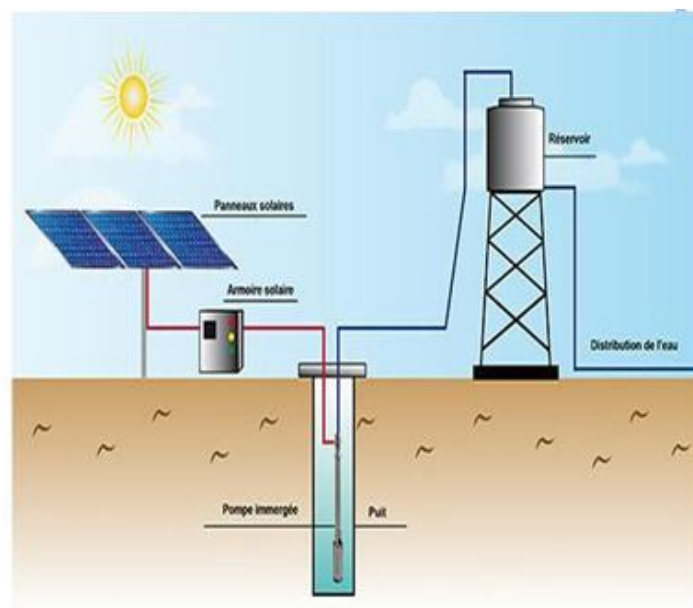


Figure I.10 : Système PV autonome sans batteries [19]

I.7.2. Systèmes raccordés au réseau (on grid) :

Ils permettent de réduire la consommation d'électricité provenant du service public et, dans certains cas, de lui renvoyer l'énergie excédentaire. Dans certains cas, le service public pourrait vous créditer l'énergie retournée au réseau. Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité [19].

Ce système s'installe sur un site raccordé au réseau (Sonelgaz en Algérie). Généralement sur des habitations ou des entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable et qui bénéficient d'un bon ensoleillement. On peut distinguer des systèmes PV raccordés aux réseaux avec et sans batteries de stockage.

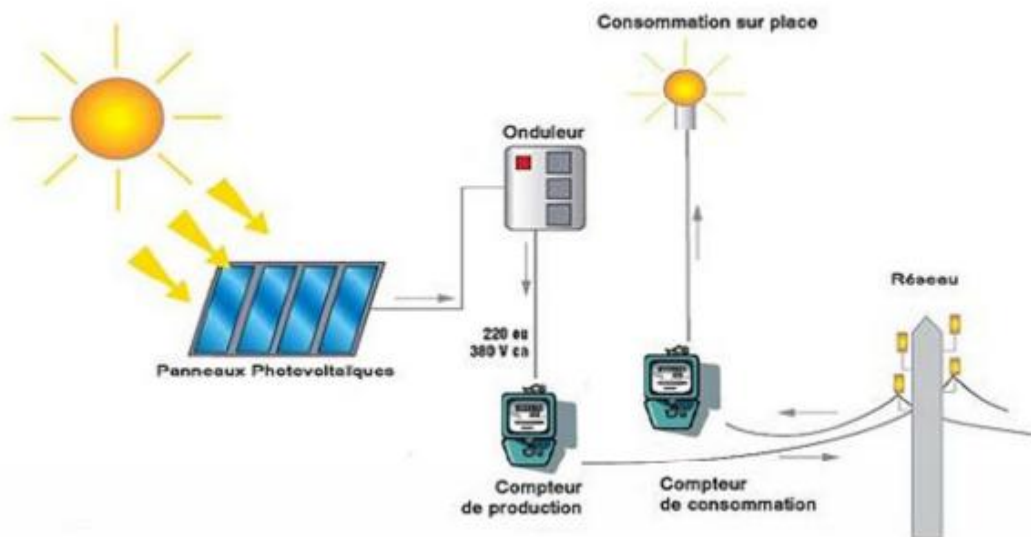


Figure I.11 : système PV raccorde au réseau sans batterie [21]

I.7.3. Systèmes hybrides :

Les systèmes photovoltaïques hybrides intègrent un générateur photovoltaïque et un autre générateur : éolienne, groupe électrogène... et même parfois le réseau public d'électricité. En général, un système de batteries stocke l'énergie et permet ainsi de ne pas perdre l'énergie des sources aléatoires telles que le solaire ou l'éolien. La difficulté de ce type de système est d'équilibrer les différentes sources d'énergie de façon à toutes les optimiser, étant entendu que les sources thermiques (gasoil, gaz...) et le réseau public, sont toujours les appoints de dernier recours [21].

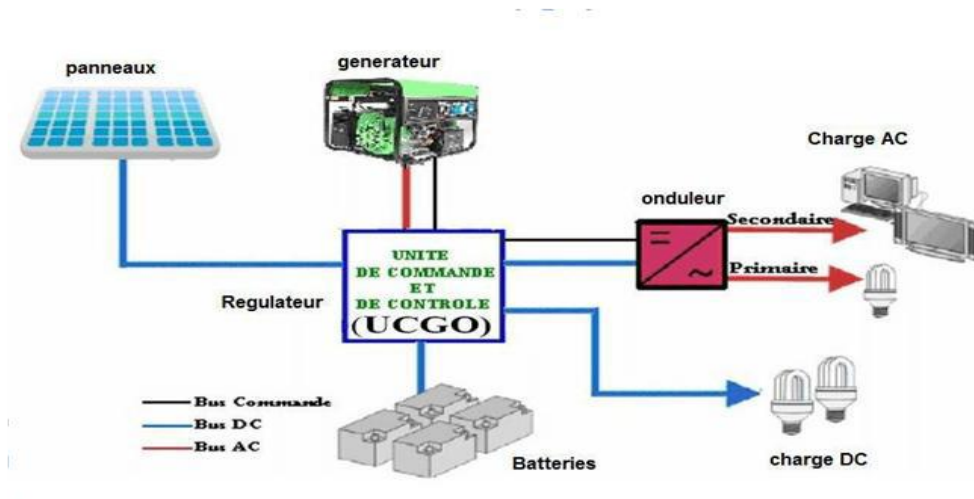


Figure I.12 : Système PV Hybride [19]

I.8. les différents branchements des panneaux PV :

I.8.1. branchement en série :

Les cellules photovoltaïques sont connectées en série afin d'augmenter la tension d'utilisation.

La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 12 volts et les modules auront donc généralement 36 cellules. De plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque. Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation.

Pour augmenter la tension d'un générateur photovoltaïque, il faut un groupement de N_S cellules en série. Ces dernières sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation suivante résume les caractéristiques électriques d'une association série de N_S cellules.

$$V_{co}(N_S \text{ Cellules}) = V_{co} * N_S$$

$$I_{cc} = I_{cc}(N_S \text{ cellules})$$

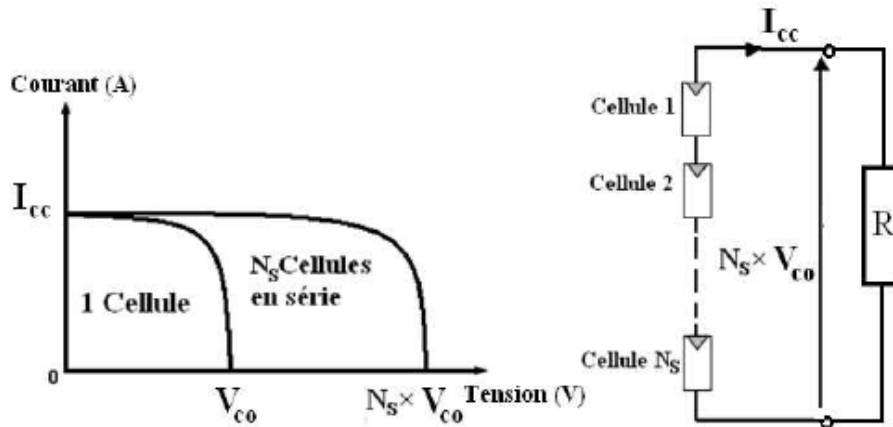


Figure I.13 : Caractéristiques résultantes d’une association de NS cellules en série [22]

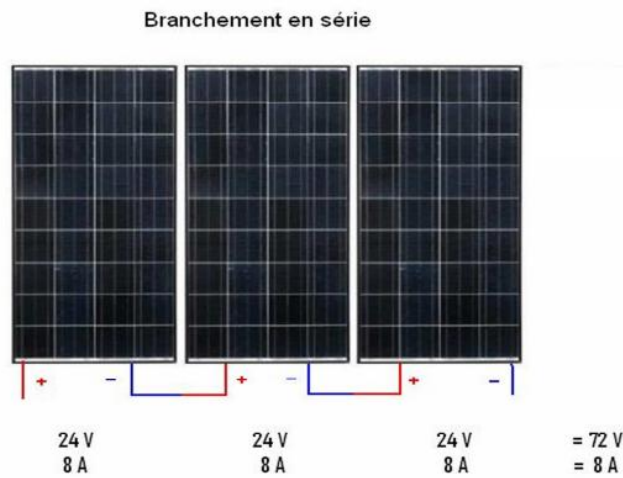


Figure I.14 : branchement en série des panneaux PV [21]

I.8.2. branchement parallèle :

En additionnant les modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l’intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche. L’équation suivant résume à son tour les caractéristiques électriques d’une association parallèle de NP cellules.

$$I_{cc}(N_p \text{ Cellules}) = I_{cc} * N_p$$

$$V_{co}(N_p \text{ cellules}) = V_{co}$$

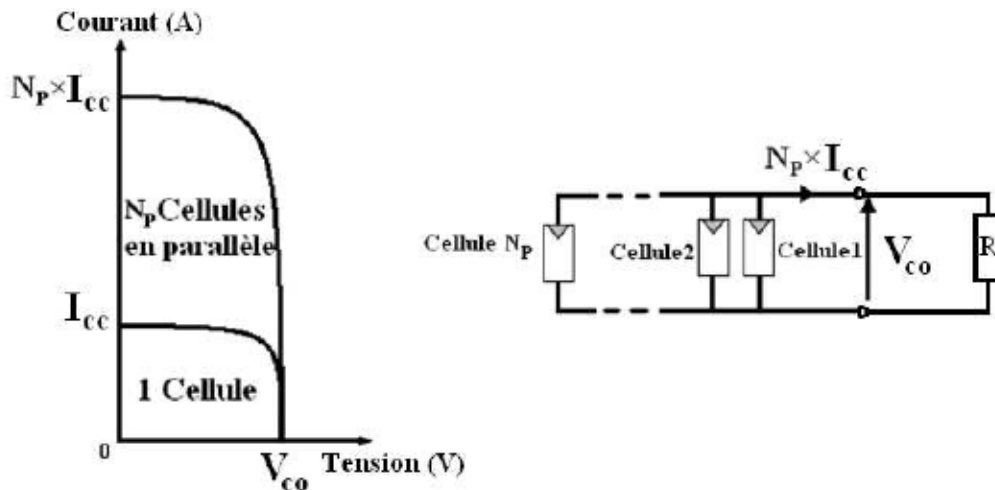


Figure I.15 : Caractéristiques résultantes d’une association de N_p cellules en parallèle

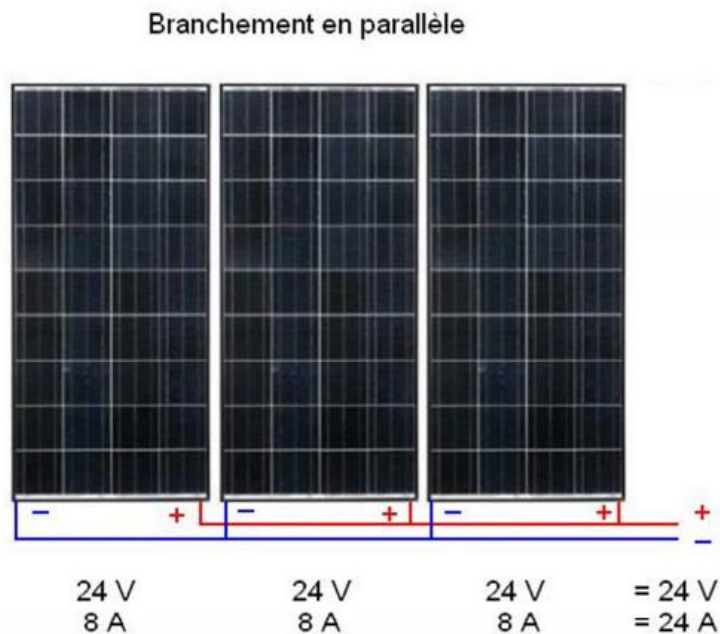


Figure I.16 : branchement parallèle des panneaux PV [19]

I.8.3. Association hybride (en série et en parallèle) :

L’association d’un réseau de cellules photovoltaïque en série/parallèle permet la représentation de la caractéristique $I(V)$ d’un générateur. Cette caractéristique peut, en outre, varier en fonction de l’ensoleillement, la température, du vieillissement des cellules et les effets d’ombrage. De plus, il suffit d’une occultation ou d’une dégradation d’une des cellules mises en série pour provoquer une forte diminution du courant solaire produit par le module photovoltaïque. Ainsi, une cellule faiblement éclairée produira un courant inférieur au courant débité et devient un élément récepteur. Celle-ci se retrouve à dissiper une quantité trop importante de puissance électrique qui pourrait aboutir à sa destruction si le défaut persiste trop longtemps.

Des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux pour éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en séries et de panneaux en parallèles.

Ainsi, plusieurs types de protections sont utilisés dans les installations actuelles afin de garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années. Ces types sont les suivants :

- Lorsque l'éclairement n'est pas homogène et pour éviter l'apparition de points chauds, il faut des diodes by-pass pour isoler le sous-réseau de cellules défectueux.
- Bien que la cellule puisse dissiper un courant important, il est préférable de disposer d'une diode anti-retour. Celle-ci empêche aussi de gaspiller dans un module occulté une partie de la puissance produite par les modules fonctionnant normalement, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.
- Afin d'éviter la circulation du courant d'une branche de modules vers une autre défaillante, il est nécessaire d'utiliser des diodes d'isolation. Dans ce cas, il inutile d'utiliser une diode anti-retour [22].

I.9. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire :

A. Avantage :

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Consommation gratuite dès l'installation du système.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du Milliwatt au Mégawatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu.

B. Les inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%.
- Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.

- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur [23].

I.10. La commande MPPT :

Le MPPT commande un étage d'adaptation qui permet de relier aisément un générateur photovoltaïque à une charge de type continue (DC) pour avoir un rendement de conversion très élevé. Pour utiliser le concept du transformateur DC avec rapport de transformation variable pour l'adaptation d'un générateur PV à une charge DC, il suffit de faire varier le rapport de transformation $n(D)$ pour trouver le point d'adaptation optimal entre le générateur PV et la charge de manière à transférer le maximum de puissance du générateur. Etant donnée la caractéristique du générateur PV, cette variation doit suivre les ordres de commande délivrés par une commande de type MPPT. L'action de contrôle provenant de la commande MPPT va induire la variation de rapport de transformation qui va indirectement correspondre à une variation de rapport cyclique du convertisseur statique DC-DC [24].

I.11. Convertisseur statique :

Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou batteries pour l'adopter à des récepteurs fonctionnant soit en tension continue différente, soit en tension alternative [25].

I.11.1.Hacheur (DC/DC) :

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant) [26] . Permettant de contrôler la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

I.11.1.1. Principe de fonctionnement :

Le hacheur est un convertisseur à transistor, permettant d'obtenir une tension réglable à partir d'un générateur à courant continu de type S_v ou S_i (tension ou courant).

Ce convertisseur agit en hachant le courant de court-circuit charge, par la commutation (ouverture-fermeture), périodique interrupteur unidirectionnel [27].

Trois types d'hacheurs seront étudiés dans ce chapitre :

I.11.1.2. Hacheur série (Buck) :

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est un appareil qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur.

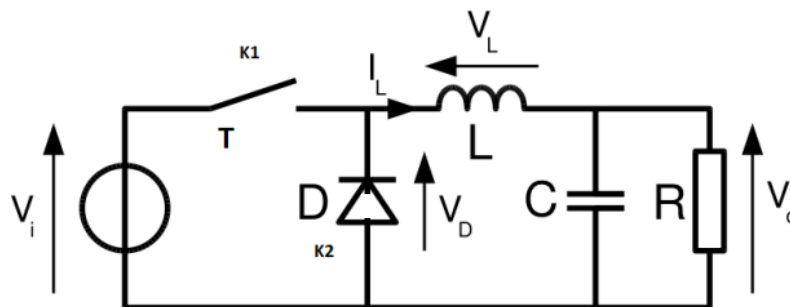


Figure I.17 : schéma d'un convertisseur Buck

-Fonctionnement :

L'interrupteur \$K1\$ est fermé pendant la fraction \$T\$ de la période de hachage. La source d'entrée fournit l'énergie à la charge \$R\$ à travers l'inductance \$L\$.

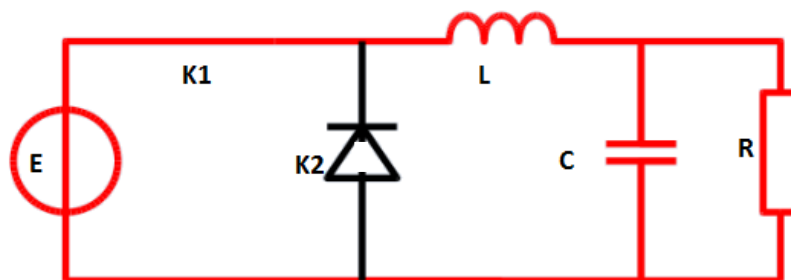


Figure I.18 : schéma équivalent lorsque \$K1\$ est fermé

Lors du blocage du transistor, la diode (\$K2\$) assure la continuité du courant dans l'inductance.

L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de charge.

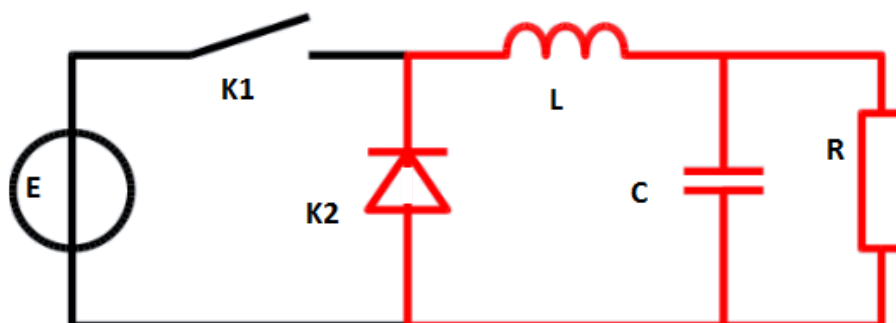


Figure I.19 : Schéma équivalent lorsque \$K1\$ est ouvert.

I.11.1.3.Hacheur parallèle (BOOST) :

Le hacheur « BOOST » est connu par le nom d'élévateur de tension, la figure (I.20) représente un schéma simple du circuit électrique d'un « BOOST ».

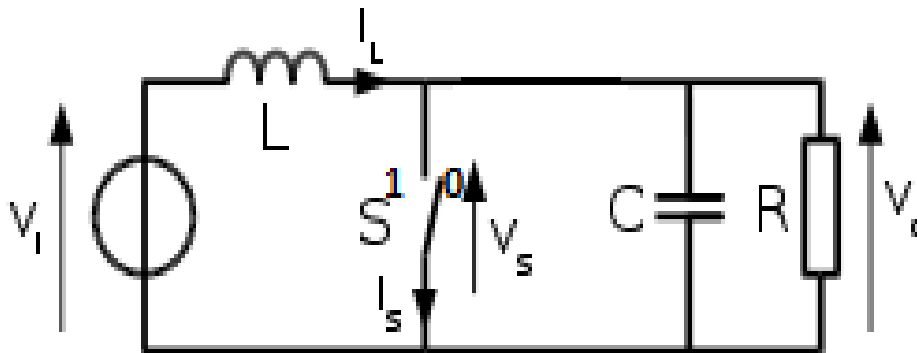


Figure I.20 : schéma d'un convertisseur BOOST.

Ce hacheur comporte trois composants :

Une inductance L, une capacité C et un interrupteur S qui peut prendre deux états 1 et 0

-Fonctionnement :

Le principe de fonctionnement de ce type d'hacheur peut être expliqué de la manière suivante :

Quand l'interrupteur est en position 1, le circuit est séparé en deux parties : à gauche, la source charge l'inductance, pendant ce temps, la capacité à droite maintient la tension de sortie utilisant l'énergie précédemment stockée.

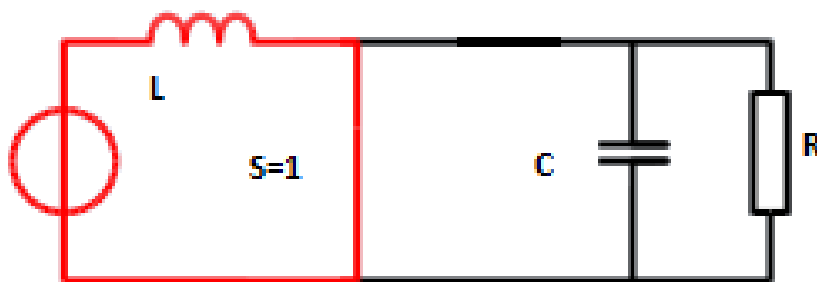


Figure I.21 : schéma équivalent lorsque S=1

Quand l'interrupteur change de position vers 0, la source DC et l'énergie stockée dans l'inductance vont ensemble alimenter le circuit à droite, d'où une augmentation de la tension de sortie.

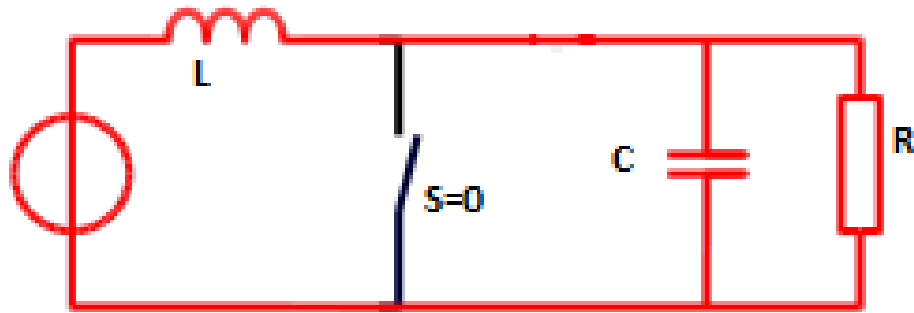


Figure I.22 : schéma équivalent lorsque $S=0$

-Avantages du convertisseur « BOOST » :

On utilise un convertisseur BOOST lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue. Les systèmes alimentés par batterie d'accumulateurs utilisent souvent plusieurs accumulateurs en série, afin de disposer d'un niveau de tension suffisamment élevé. La place disponible étant souvent limitée, il n'est pas toujours possible de disposer d'un nombre suffisant d'éléments. Un convertisseur BOOST permet d'augmenter la tension fournie par les batteries et ainsi diminuer le nombre d'éléments nécessaires pour atteindre le niveau de tension désiré. Les systèmes photovoltaïques sont des exemples typiques d'utilisation des convertisseurs BOOST [26].

I.11.1.4. Hacheur (série-parallèle), type BUCK-BOOST :

Le hacheur série-parallèle est une combinaison de deux hacheurs série et parallèle. Leur combinaison nous permet d'obtenir la tension de sortie désirée en modifiant la tension d'entrée [28].

I.11.2. Les convertisseur (DC/AC) :

I.11.2.1. Les onduleurs :

Les onduleurs sont des circuits statiques qui transforment une puissance électrique sous forme continue en une puissance sous forme alternative, à une valeur désirée de tension ou du courant et de fréquence. La tension de sortie d'un onduleur à une forme d'onde périodique qui n'est pas sinusoïdale, mais qui peut être très proche de la forme d'onde souhaitée [26].

On distingue deux grands types d'onduleurs :

- Les onduleurs de tension, alimentés par une source de tension continue.
- Les onduleurs de courant, alimentés par une source de courant continu

I.11.2.1.1. Onduleur de tension :

L'onduleur utilisé dans ce système est un onduleur de tension triphasé à six interrupteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture ; ce sont des transistors de types IGBT auxquels sont placés des diodes en antiparallèle. L'onduleur est alors constitué de trois bras, dont les deux interrupteurs de chaque bras conduisent de manière complémentaire. Les séquences de commutation des interrupteurs sont fonction de la commande à utiliser (commande en pleine onde, commande en MLI « Modulation de Largeur d'Impulsion » et hystérésis).

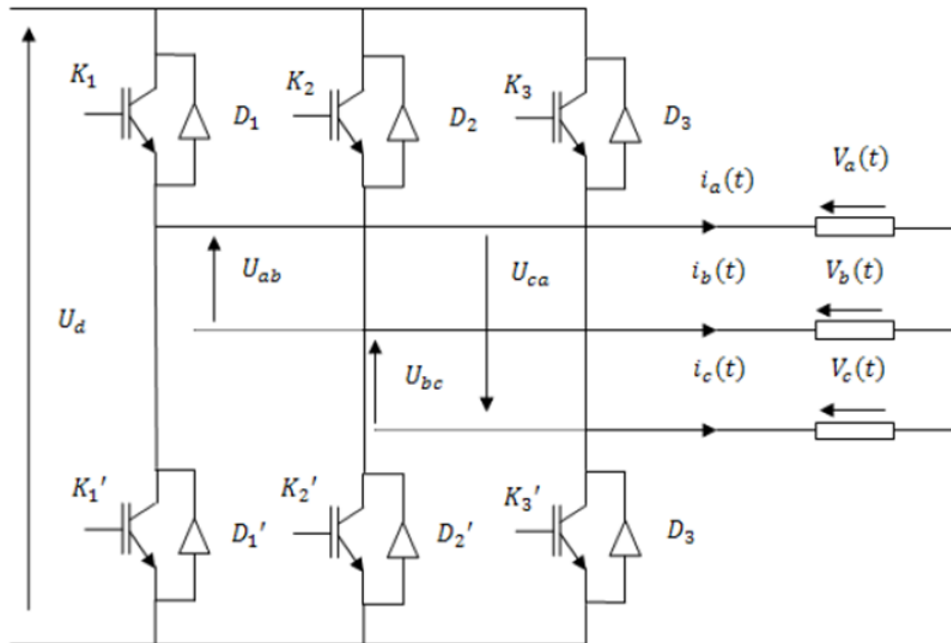


Figure I.23 : Schéma d'un onduleur de tension [29]

I.11.2.1.2 Onduleur de courant :

L'onduleur de courant présente un grand inconvénient en raison de l'inductance du moteur asynchrone, car ce dernier lui fournit des créneaux de courant l'ors de la montée et de la décente rapide dans une phrase, ça crée une surtension [30].

I.12. Commande vectorielle de la MSAP :

Il existe deux méthodes distinctes pour contrôler le courant :

- L'une ne nécessite pas la connaissance du modèle électrique de la machine et consiste à imposer directement les courants de phase dans une bande autour des courants de référence, c'est la méthode de contrôle par des régulateurs à hystérésis.
- L'autre méthode exige la connaissance du modèle de la machine et permet en fonction de l'erreur des courants de phase par rapport à leurs références de déterminer les références des tensions qui seront imposées aux bornes de la machine grâce à un onduleur de tension commandé en modulation de largeur d'impulsion (M.L.I).

I.12.1. Modulation de la largeur d'impulsion (MLI) :

La MLI permet de former chaque alternance de la sortie de plusieurs créneaux ; pour obtenir cela, on adopte certaine technique de commande des interrupteurs de l'onduleur. Elle consiste de comparer les trois tensions de référence (V_a^* , V_b^* , V_c^*) :

- Calculée pour une transformation inverse de PARK a un signal (porteuse) Triangulaire d'amplitude fixe est de pulsation nettement supérieur à celle des tensions de référence.

La stratégie sinus-triangle est caractérisée par 2 paramètres qui sont :

- L'indice de modulation m [$m = \text{fréquence de } V_p(t) / \text{fréquence de } V_{ref}(t)$] qui représente le rapport de la fréquence de la porteuse à la fréquence de référence.
- Le coefficient de réglage r ($r = V_{ref} / V_p$) en tension qui représente le rapport de l'amplitude de l'onde de référence à la valeur de crête de la porteuse.
- La loi de commande a pour but de :
 - Repousser les harmoniques à des fréquences élevées pour leur filtrage.
 - Faire varier la valeur efficace du fondamental de la tension de sortie.
 - Les instants de commutation sont obtenus par comparaison de trois tensions de référence correspondant aux tensions de sortie désirées de fréquence f à la fréquence f_p du signal triangulaire [30].

I.12.2. Commande par hystérésis :

Cette commande, basée sur le contrôle direct en courant, est très adaptée pour les organes de commande ayant une action à deux positions comme l'IGBT qui peut être soit ouvert ou bloqué, elle consiste principalement à maintenir les courants générés dans une bande enveloppant le courant de référence. Chaque dépassement de cette bande donne un ordre de commutation. La commande de courant par hystérésis est la technique la plus simple utilisée pour le contrôle des courants dans le système de filtrage actif parallèle ; la simplicité à la mise en œuvre, la robustesse, l'exactitude en poursuite de courant de référence et une dynamique extrêmement bonne.

I.13. Groupe moteur-pompe :

I.13.1. Machine synchrone à aimants permanents (MSAP) :

La machine synchrone à aimants permanents est un dispositif électromécanique qui comprend un stator et un rotor. Le stator est une partie fixe où se trouvent les enroulements liés à la source. Le rotor est une partie mobile qui est monté sur l'axe de rotation.



Figure I.24 : Structure de moteur synchrone à aimants permanents [31]

I.13.1.1. Principe de fonctionnement de la MSAP :

Toute machine électrique dans laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé machine synchrone. Pour l'obtention d'un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique doit être généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. Cela dit, qu'en mode permanent la position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ceci impose une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique [32].

I.13.1.2. Constitution de la machine synchrone à aimants permanents :

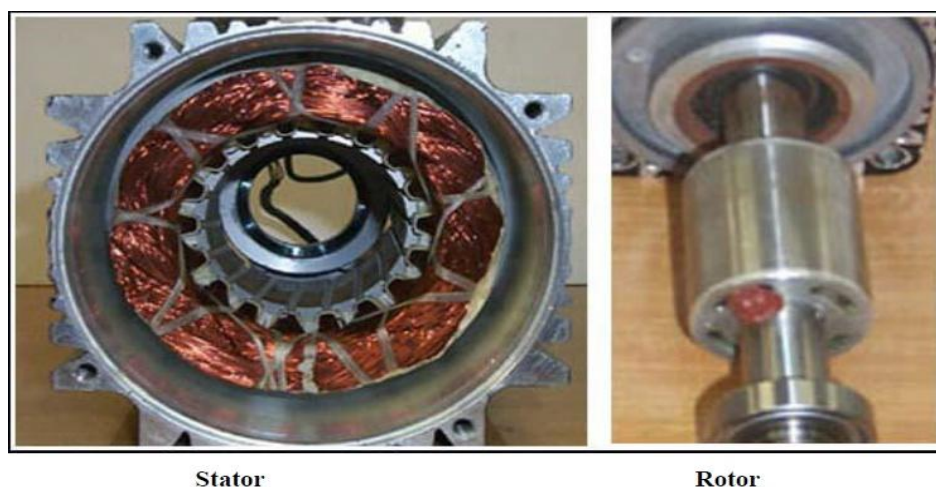
La machine synchrone est constituée de deux parties, la partie mobile ou rotor constituant l'inducteur et une partie fixe ou stator portant les enroulements constituant l'induit, la mince zone entre les deux parties précédentes est appelée l'entrefer.

- **Stator** : il est similaire à celui de la machine asynchrone. Il se compose d'un bobinage distribué triphasé, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales ou trapézoïdales. Ce bobinage est logé dans les encoches creusées dans le circuit magnétique fixe. Ce dernier est feuilleté afin de réduire les courants de Foucault et de limiter les pertes dans le fer.

Il est généralement construit en tôle à base d'alliage Fer-Silicium qui permet l'obtention d'une induction élevée.

- **Rotor** : les enroulements parcourus par un courant continu (dans le cas de la machine à rotor bobiné) sont remplacés par des aimants permanents alternants pôles nord et pôles sud. Le flux inducteur balaye les enroulements statoriques et y induit des forces électromotrices (f-é-m) alternatives. L'interaction des champs rotorique et statorique donne naissance au couple électromagnétique.

La figure (I.25) présente une image des parties de la machine synchrone à aimant permanent (le stator et le rotor) :



Stator

Rotor

Figure I.25 : Stator et rotor de la machine synchrone à aimant permanent [33]

I.13.1.3. Avantages et inconvénients de la MSAP :

La MSAP à plusieurs avantages mais aussi elle a quelques inconvénients :

A. Les avantages :

Avec l'avènement des matériaux à aimants permanents de grande énergie et les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, les machines à aimants permanents (MSAP) ont connu ces dernières années un grand essor. Elles ont été adoptées dans de nombreuses applications de hautes performances. Pour toutes ces applications, les machines à aimants permanents sont parfois préférables aux autres machines traditionnelles, telles que les machines à courant continu, les moteurs synchrones classiques et les moteurs asynchrones et en particulier pour les applications spécifiques (servomoteur à vitesse variable). A titre d'illustration, quelques avantages des machines à aimants permanents, sont cités ci-dessous :

- L'absence d'enroulement rotorique annule les pertes Joules au niveau du rotor.
- Le couple volumique et la puissance massique importante permettent une meilleure compacité.
- L'absence des collecteurs et des balais simplifie la construction et l'entretien.
- La densité du flux, relativement élevée dans l'entrefer, assure une très bonne performance dynamique.
- Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage.
- Très bon rendement et un facteur de puissance élevé (proche de l'unité).
- Grande fiabilité.
- Fonctionnement à très haute vitesses [34] [35].

B. Les inconvénients :

- Coût élevé (à cause du prix des aimants).
- Problème de tenue en température des aimants.
- Risque de démagnétisation irréversible des aimants par la réaction d'induit.
- Impossibilité de régler l'excitation.
- Pour atteindre des vitesses élevées, il est nécessaire d'augmenter le courant Statorique afin de démagnétiser la machine. Ceci entraînera inévitablement une augmentation des pertes statoriques par effet Joule.
- La non-régulation de ce flux ne permet pas une souplesse de contrôle sur une très large plage de vitesse.
- Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine [36].

I.13.1.4. Les Domaines d'application de MSAP :

Le moteur synchrone à aimants permanents est utilisé dans une large gamme de puissance, allant de centaines de Watts (servomoteurs) à plusieurs méga Watts (systèmes de propulsion

des navires), dans des applications aussi diverses que le positionnement, la synchronisation l'entraînement à vitesse variable, et la traction. C'est ainsi que le moteur synchrone peut être très utile dans de nombreuses applications, comme :

- les équipements domestiques (machine à laver le linge),
- les automobiles,
- les outils électriques, jouets, système de vision et ses équipements,
- les applications robotiques,
- la production d'électricité,
- la propulsion des véhicules électriques et la propulsion des sous-marins
- les machines-outils,
- les applications de l'énergie de l'éolien [37].

I.14. la pompe :

Une pompe est un appareil transformant une énergie mécanique (couple et vitesse de rotation de l'arbre), en énergie hydraulique (débit et pression). Elle est utilisée dans des forages et choisie selon la hauteur manométrique que devra fournir la pompe pour garantir le fonctionnement [37].

I.14.1. Les types de pompes :

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. On distingue également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée : la pompe à aspiration et la pompe à refoulement. La hauteur d'aspiration de n'importe quelle pompe est limitée à une valeur théorique de 9,8 mètres (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 ou 7 mètres [39].

I.14.1.1. Pompe centrifuge :

Les pompes centrifuges sont les plus rencontrées dans le domaine du pompage d'eau. Elles sont couplées avec les moteurs asynchrones constituant un groupe électropompe.

I.14.1.1.1. Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge :

La pompe centrifuge transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou d'ailettes. L'eau entre au centre de la pompe et est poussée vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force centrifuge des aubages. Le mouvement du liquide résulte de l'accroissement d'énergie qui lui est communiqué par la force centrifuge. La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique (HMT) relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. On utilise habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres) [40].

I.14.1.1.2. Constitution de la pompe centrifuge :

Les pompes centrifuges sont essentiellement constituées d'une pièce en rotation le rotor appelée aussi roue ou hélice qui tourne dans un carter appelée corps de pompe ou volute.

Ces machines comprennent donc [41] :

- Une roue à aubes tournant autour de son axe
- Un distributeur dans l'axe de la roue
- D'un corps de pompe
- Tubulure d'aspiration
- Tubulure de refoulement
- Arbre et chemises
- Collecteur à volute
- Anneaux d'usure

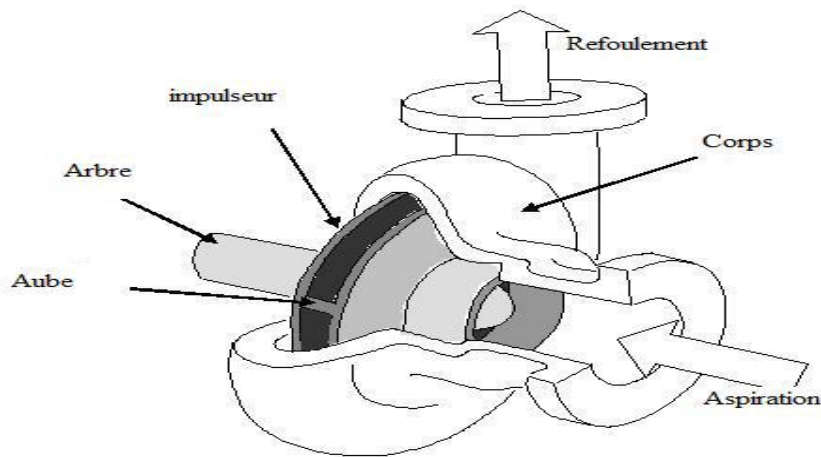


Figure I.26 : Pompe centrifuge [42]

I.14.1.1.3. Caractéristiques d'une pompe centrifuge :

- Grand débit ;
- Le débit est proportionnel à la vitesse lorsqu'elle atteint une certaine valeur ;
- La puissance absorbée est proportionnelle au cube de la vitesse ;
- Le Couple est fonction du carré de la vitesse ;
- La pression est proportionnelle à la vitesse ;
- Couple de démarrage est quasiment nul qui est intéressant dans l'application du système photovoltaïque car la pompe peut tourner à un faible ensoleillement et le moteur peut avoir une vitesse de rotation rapide, à peu constant [43] [44].

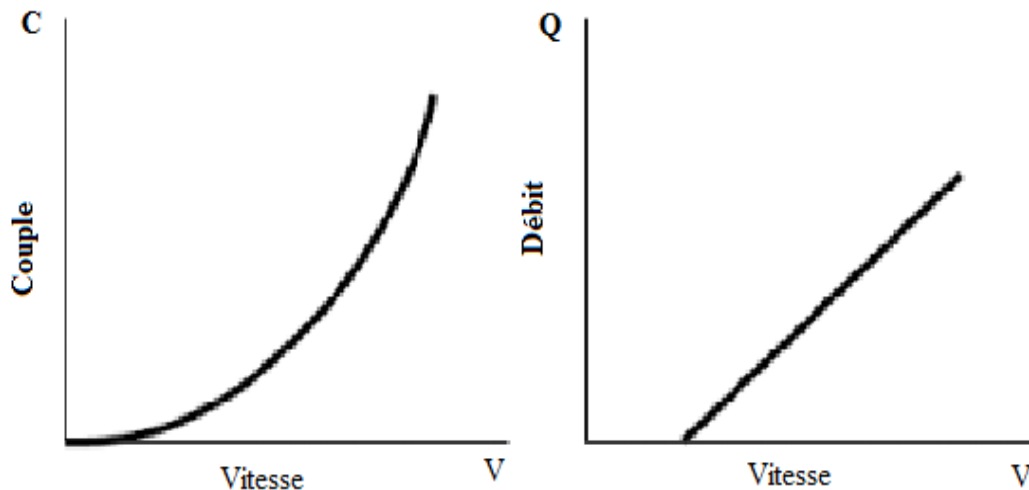


Figure I.27 : Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge [42]

I.14.1.1.4. Les avantages et les inconvénients des Pompes centrifuges :

A. Avantages :

- Construction simple en général, une seule pièce en mouvement « le rotor ».
- Prix peu élevé.
- Encombrement réduit.
- Jeu assez large, donc facilité de manipuler des liquides contenant des solides en suspension.
- Entretien en général peu coûteux.
- Peu d'influence de l'usure ou de la corrosion sur les caractéristiques.
- Très large gamme de qualités matières suivant le service requis.
- Grand flexibilité d'utilisation.
- Ajustement automatique du débit à la pression.
- Puissance absorbée limitée, donc sans danger.

B. Inconvénients :

- Limitation de la viscosité.
- En fait, la pompe centrifuge est limitée pratiquement à des viscosités de l'ordre de 100cSt (centistokes) et son rendement chute rapidement au-delà de cette valeur.
- Débit légèrement instable, dans les basses valeurs : difficulté de contrôler le débit [45].

I.14.1.2. Les pompes volumétriques :

Ce sont des pompes à l'intérieur desquelles une transformation d'énergie mécanique en énergie de pression est assurée par un refoulement périodique du liquide. L'énergie de pression

est assurée par un refoulement périodique du liquide de la chambre d'aspiration à celle du refoulement à l'aide d'un piston, vis ; engrenage et palette.

I.14.1.2.1.Principe de fonctionnement :

Une pompe volumétrique se compose d'un corps de pompe parfaitement clos, à l'intérieur duquel se déplace un élément mobile rigoureusement ajusté. Leur fonctionnement repose sur l'exécution d'un mouvement cyclique, et pendant un cycle, un volume déterminé de liquide pénètre dans un compartiment avant d'être refoulé à la fin.

Ce mouvement permet le déplacement du liquide entre, l'orifice d'aspiration, et l'orifice de refoulement. On peut distinguer deux grandes classes correspondant à deux principes de fonctionnement : les pompes volumétriques rotatives ou alternatives.

Les pompes volumétriques sont généralement auto-amorçages. Dès leur mise en route elles provoquent une diminution de pression en amont, qui permet l'aspiration du liquide. Il est nécessaire, néanmoins d'examiner la notice du fabricant. Les pompes volumétriques permettent d'obtenir des hauteurs manométriques totales beaucoup plus élevées que les pompes centrifuges

La pression au refoulement est, ainsi plus importante. Le débit est par contre généralement plus faible, mais il ne dépend pratiquement pas des caractéristiques du réseau. Le rendement est souvent voisin de 90% [46].



Figure I.28 : Pompe volumétrique [42]

I.14.1.2.2. Caractéristiques des pompes volumétriques :

- Faible débit et une grande hauteur manométrique totale
- Le débit et la puissance absorbée sont proportionnels à la vitesse
- Le couple est fonction de la HMT
- Le couple de démarrage est de 3 à 5 fois le couple nominal [43] [44].

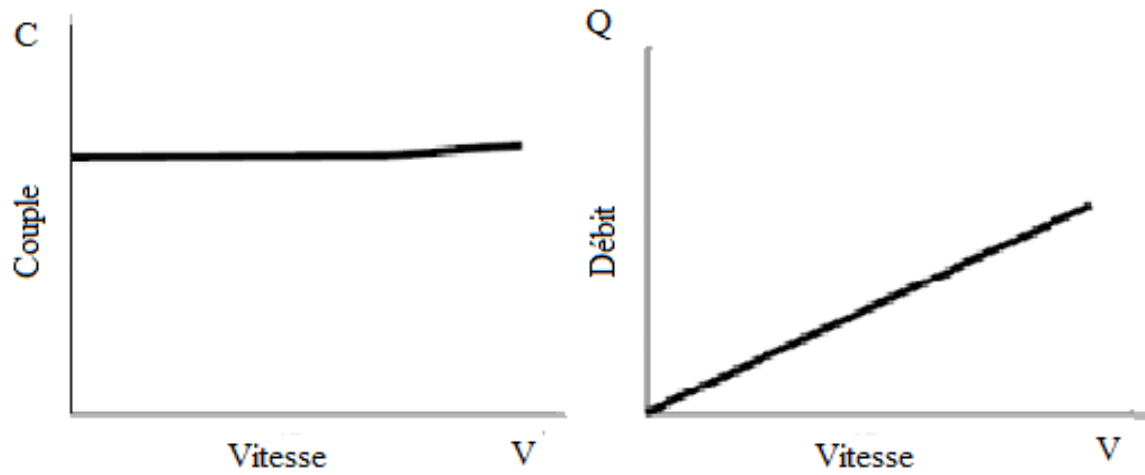


Figure I.29 : Caractéristiques d'une pompe volumétrique [42]

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté un rappel théorique sur les différents systèmes de pompage photovoltaïque utilisé, Puis, nous avons décrit l'ensemble des éléments constitutants du système choisi pour notre étude.

Chapitre II

Modélisation des
éléments du système
photovoltaïque

II. Introduction :

La modélisation d'un système physique conduit à l'établissement des équations mathématiques régissant la dynamique de ce système, d'où un modèle est la représentation mathématique d'une entité réelle de son fonctionnement : quand on dispose d'un modèle, on peut simuler le comportement de cette entité [47] .

Dans ce chapitre, nous allons présenter la modélisation individuelle de chaque élément du système photovoltaïque qui consiste le convertisseur DC-DC (hacheur) pour la synthèse une loi de commande (MPPT).

II.1. Modélisation du générateur photovoltaïque :

II.1.1. Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

II.1.1.1. Cellule photovoltaïque idéal :

Le photopile est un composant semi-conducteur qui délivre un courant en excitant ce dernier par des photons, donc en première approximation nous avons une source de courant I_{ph} , proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode figure(II.1) qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV.

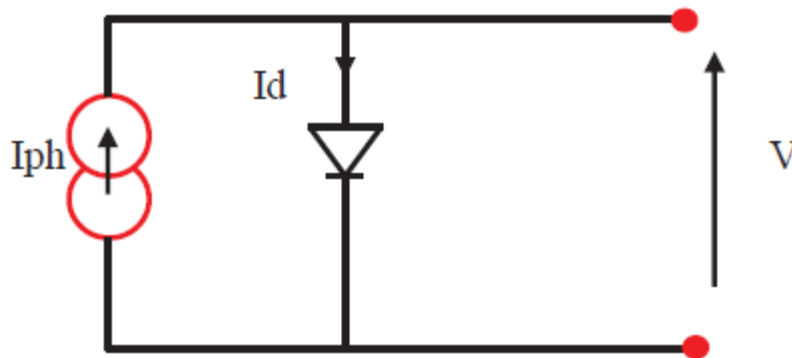


Figure II.1 : Schéma d'une cellule photovoltaïque idéale

D'après les lois des nœuds :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (1)$$

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :

$$V = V_d \quad (2)$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_d = I_0 \cdot e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \quad (3)$$

Avec :

I_0 : Courant de saturation de la diode

V_d : Tension à la borne de la diode

$V_t : \frac{K_T}{q}$ Potentiel thermique

K : constante de Boltzmann ($1,381.10^{-23}$ Joule/Kelvin)

q : charge d'électron = $1,602. 10^{-19}C$

T : température de la cellule en Kelvin

I_{ph} : Courant photonique

Donc la relation (1) sera :

$$I = I_{ph} - [I_0 \cdot e^{\frac{V_d}{V_t} - 1}] \tag{4}$$

II.1.1.2. Cellule photovoltaïque réelle :

Une cellule PV peut se modéliser à partir de l'équation définissant le comportement statique de la jonction PN d'une diode classique. Ainsi, la figure II.2 illustre le schéma électrique équivalent d'une cellule PV réelle. Dans cette équation, nous prenons en compte le courant de court-circuit et les différentes résistances modélisant les pertes dues à la connectique

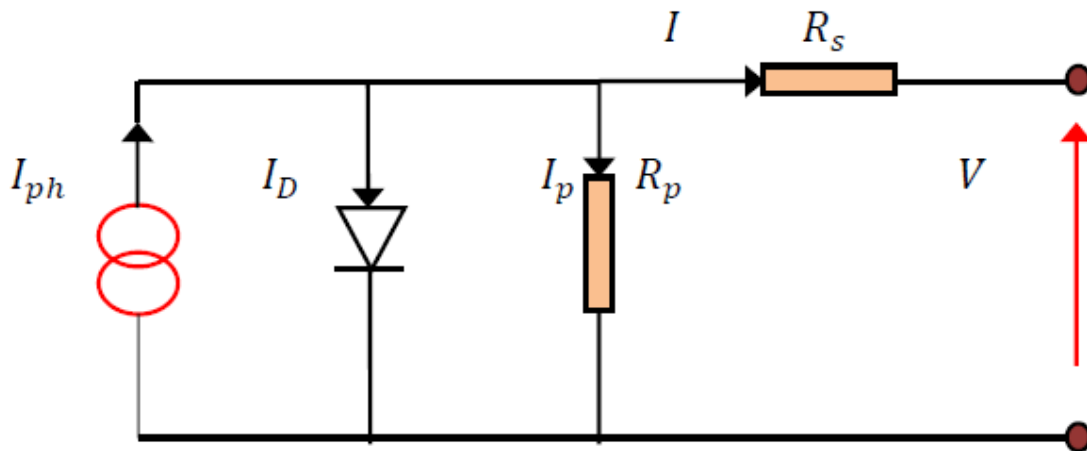


Figure II.2 : Schéma équivalent de cellule PV réelle

En statique, le comportement d'une cellule PV constituée d'une jonction PN à base de silicium peut être décrit par l'équation suivante [48] :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \tag{5}$$

$$I_p = \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \tag{6}$$

$$I_d = I_0 \cdot e^{\frac{V + R_s \cdot I}{V_t} - 1} \tag{7}$$

De (5), (6) et (7) devient :

$$I = I_{ph} - \left[I_0 \cdot e^{\frac{V + R_S \cdot I}{V_t}} - 1 \right] - \left[\frac{V + R_S \cdot I}{R_P} \right] \quad (8)$$

II.1.2. Panneau photovoltaïque :

Dans le but d’avoir un modèle simple à utiliser, nous avons procédé à la mise en œuvre d’un modèle du panneau photovoltaïque sous MATLAB/SIMULINK qui va être utilisé dans la suite de notre travail. Le modèle est basé sur l’équation (8), comporte deux paramètres d’entrée : la température et l’ensoleillement et deux paramètres de sortie : la tension et le courant).

Dans notre étude, le module **SIMENS SM 110-24** est choisi comme modèle de simulation sous MATLAB/SIMULINK pour déterminer l’influence de la température et de l’éclairement sur le fonctionnement des panneaux photovoltaïques et ce module a les caractéristiques suivantes :

P_{PV}	Puissance photovoltaïque (W)	110 W
I_{mpp}	Courant maximum au PPM (A)	3.15 A
V_{mpp}	Tension maximum au PPM (V)	35 V
I_{CC}	Courant de court-circuit (A)	3.45 A
V_{co}	Tension de circuit ouvert (V)	43.5 V
α_{sc}	Coefficient de la température de court-circuit (A/°K)	1.4 mA /°C
β_{oc}	Coefficient de tension (V/°K)	-152mV/°C
P_{mpp}	Puissance maximale (W)	110 W

Tableau II : caractéristiques de panneau

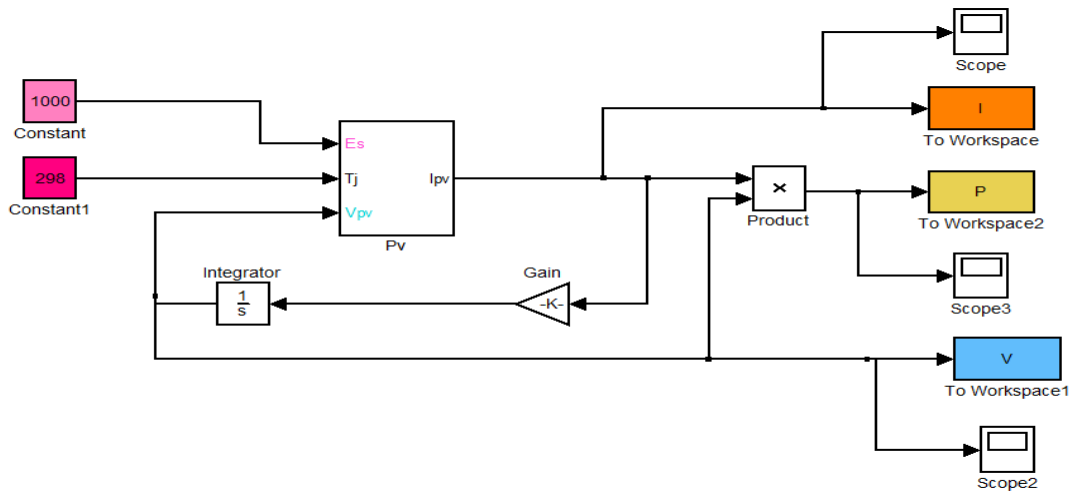


Figure II.3 : Schéma de générateur PV en MATLAB/SIMULINK

II.1.2.1. Caractéristique tension-courant d'un GPV :

La figure (II.4) illustre la caractéristique non linéaire I(V) d'un GPV à base de silicium pour un éclaircment $E=1000 \text{ W/m}^2$ et une température $T=25^\circ\text{C}$ (conditions de fonctionnement standards).

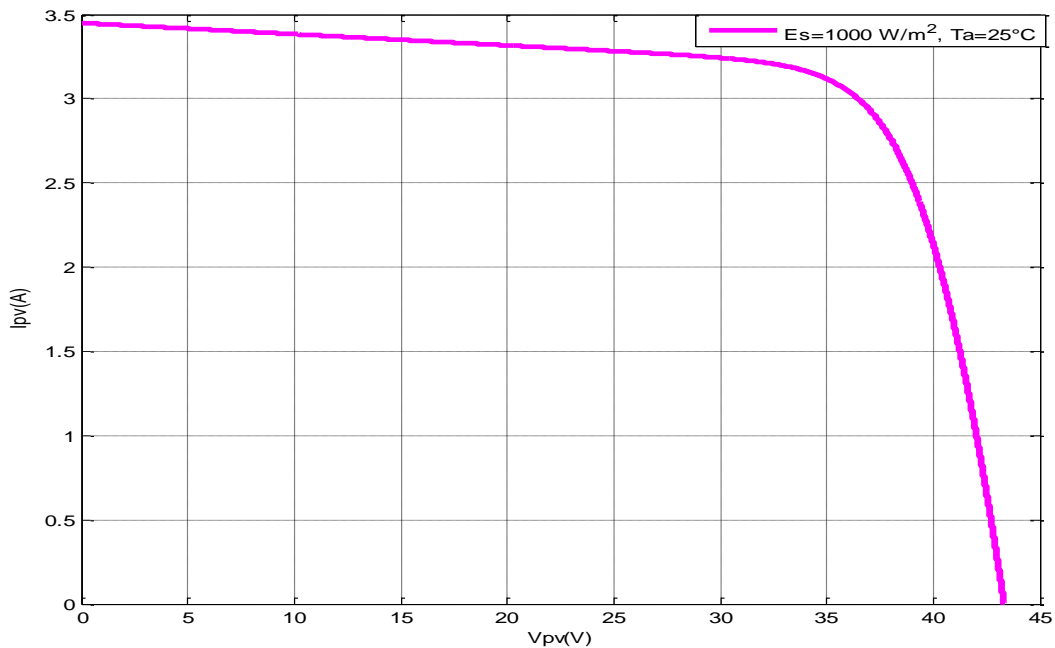


Figure II.4 : Caractéristique I(V) d'un GPV dans les conditions standards.

II.1.2.2. Caractéristique puissance-courant d'un GPV :

La figure (II.5) illustre la caractéristique non linéaire P(V) d'une GPV à base de silicium pour un éclaircment $E=1000 \text{ W/m}^2$ et une température $T=25^\circ\text{C}$ (conditions de fonctionnement standards).

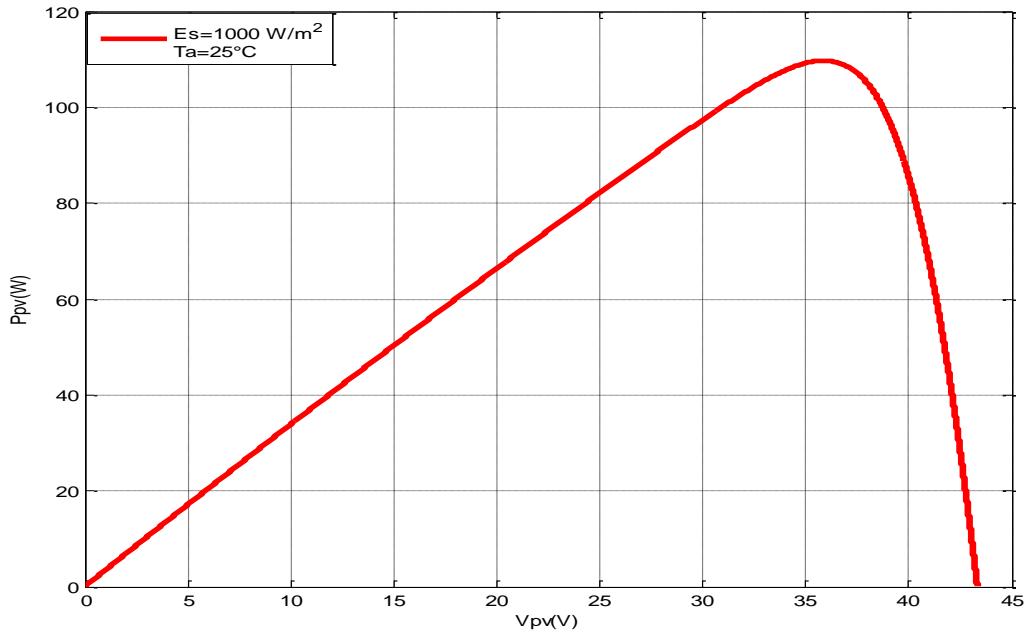


Figure II.5 : Caractéristique P(V) d'un GPV dans les conditions standards

II.1.2.3. Effet de l'éclairement :

On applique une température $T=25^\circ\text{C}$ maintenue constante et l'on fait varier l'ensoleillement (G) de 200 W/m^2 jusqu'à 1000 W/m^2 , les résultats obtenus sont illustrés par les figures suivant :

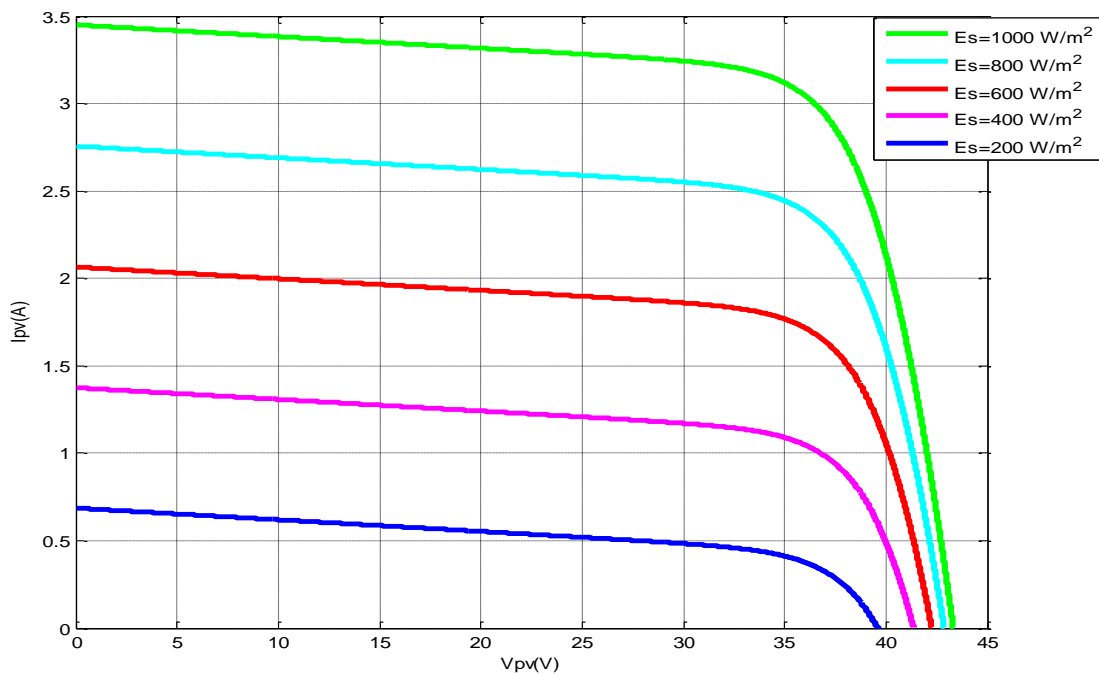


Figure II.6 : influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I_{pv}=f(V_{pv})$

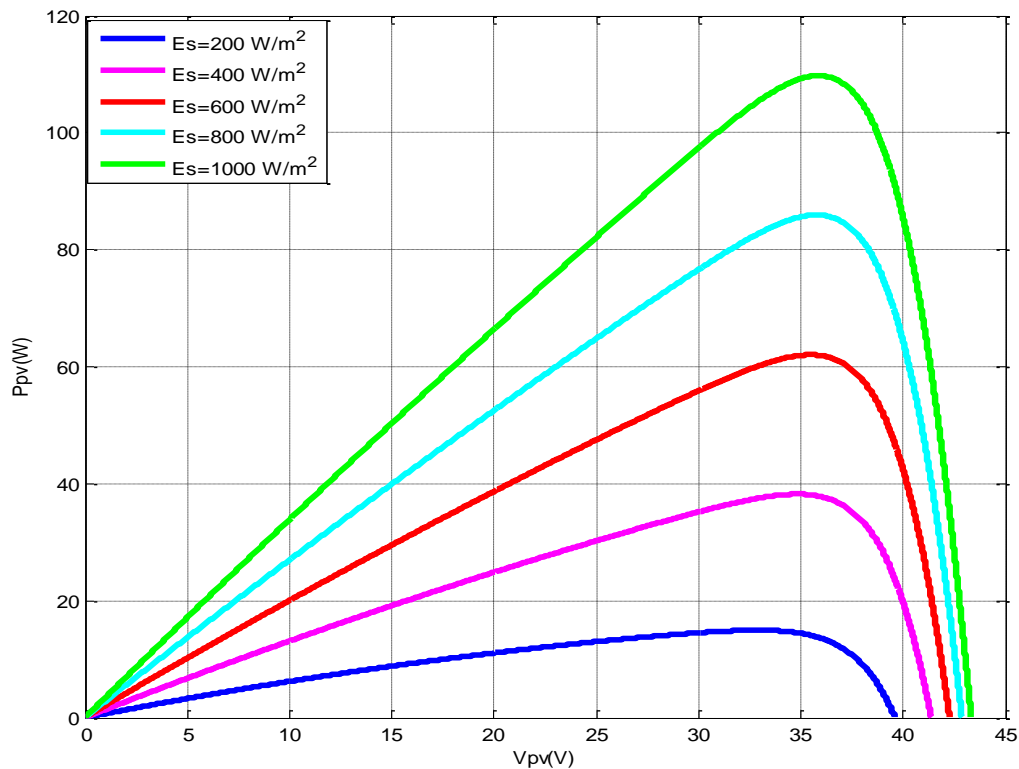


Figure II.7 : influence de l'éclairement sur les caractéristiques $P_{pv}=f(V_{pv})$

La caractéristique du courant-tension pour différentes valeurs de l'éclairement est décalée d'une distance proportionnellement aux rayonnements solaires. Une augmentation de l'ensoleillement engendre essentiellement une augmentation du courant PV, par conséquent la puissance du PV augmente.

II.1.2.4. Effet de la température :

De la même façon on va varier la valeur de la température (on prend $T_a=25^\circ\text{C}$; $T_a=35^\circ\text{C}$; $T_a=45^\circ\text{C}$; $T_a=55^\circ\text{C}$) puis on simule et on va avoir les figures si dessous (figure II.8 et figure II.9), toute en gardant l'ensoleillement constante.

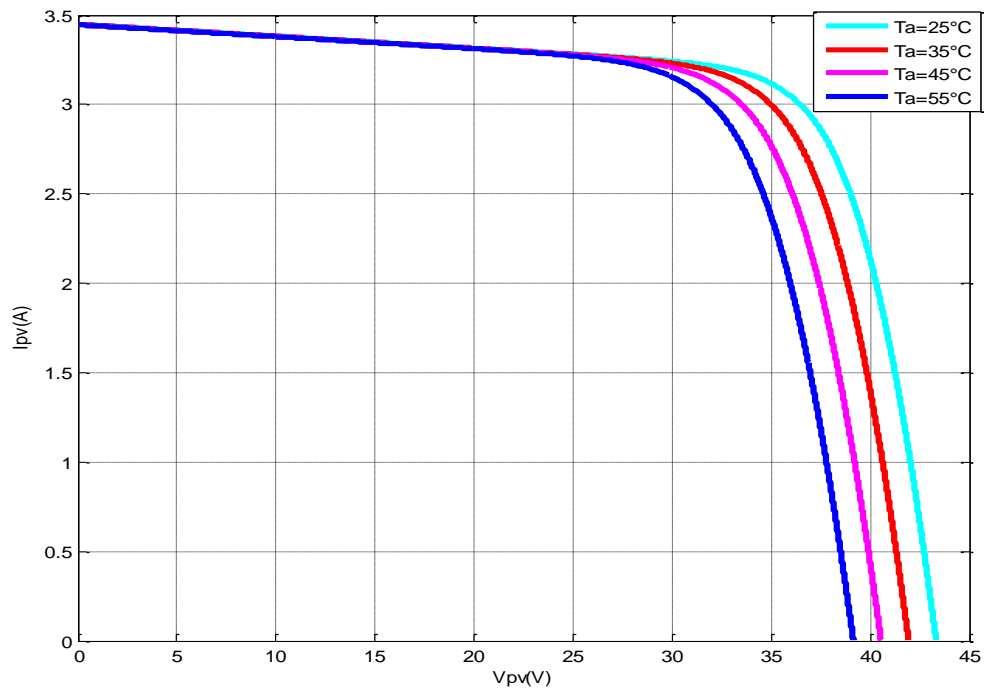


Figure II.8 : influence de la température sur les caractéristiques $I_{pv}=f(V_{pv})$

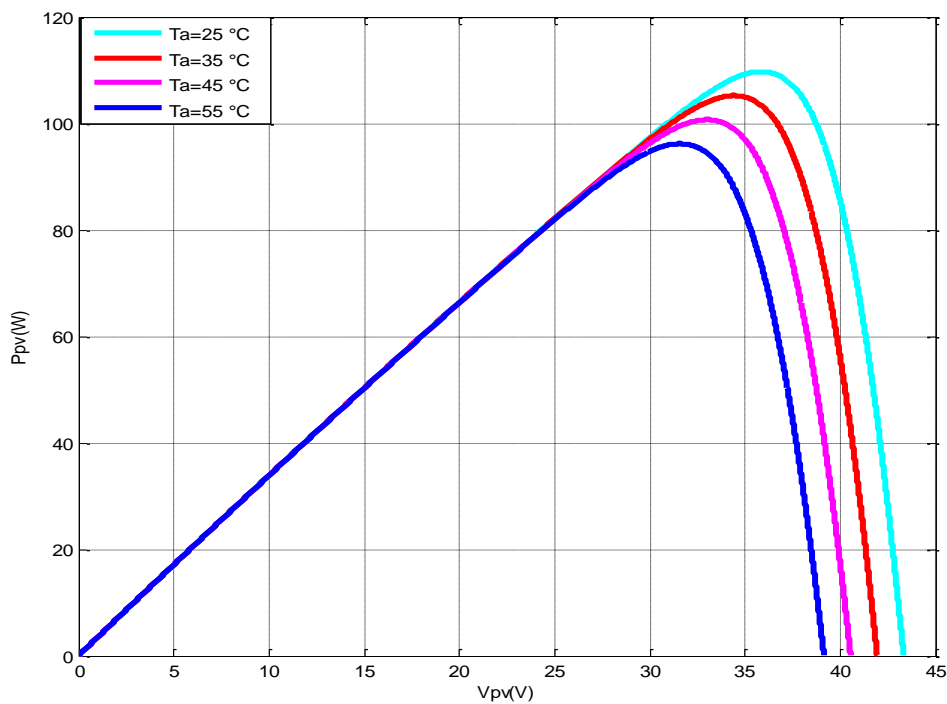


Figure II.9 : influence de la température sur les caractéristiques $P_{pv}=f(I_{pv})$

Nous remarquons que l'augmentation de la température entraîne principalement une diminution de la tension par conséquent la puissance du GPV diminue. La Figure II.10 montre qu'une augmentation de la température 25°C à 75°C engendre une chute de puissance de 25%.

II.2. Optimisation de la puissance des modules PV (contrôle MPPT)

Le MPPT commande un étage d'adaptation qui permet de relier aisément un générateur photovoltaïque à une charge de type continue (DC) pour avoir un rendement de conversion très élevé. Pour utiliser le concept du transformateur DC avec rapport de transformation variable pour l'adaptation d'un générateur PV à une charge DC, il suffit de faire varier le rapport de transformation $n(D)$ pour trouver le point d'adaptation optimal entre le générateur PV et la charge de manière à transférer le maximum de puissance du générateur. Etant donnée la caractéristique du générateur PV, cette variation doit suivre les ordres de commande délivrés par une commande de type MPPT. L'action de contrôle provenant de la commande MPPT va induire la variation de rapport de transformation qui va indirectement correspondre à une variation de rapport cyclique du convertisseur statique DC-DC [20].

$$V_S = n(D) * V_e \quad (9)$$

Si nous prenons l'exemple du convertisseur DC-DC (SEPIC), la tension d'entrée du convertisseur :

$$V_e = V_S * (1-D)/D \quad (10)$$

V_e : La tension d'entrée,

V_S : La tension de sortie,

D : Le rapport cyclique du convertisseur,

L'impédance vue par le générateur PV est R_e ,

Ou :

$$R_e = \frac{R_{ch}(1-D)^2}{D^2} \quad (11)$$

Si D augmente R_e diminue, la tension diminue aussi,

Si D diminue R_e augmente, la tension augmente aussi,

Le contrôle MPPT (figure) fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique, qui influe sur le sens de la variation de tension de telle sorte que la puissance fournie par le générateur PV soit la puissance maximale disponible à ses bornes.

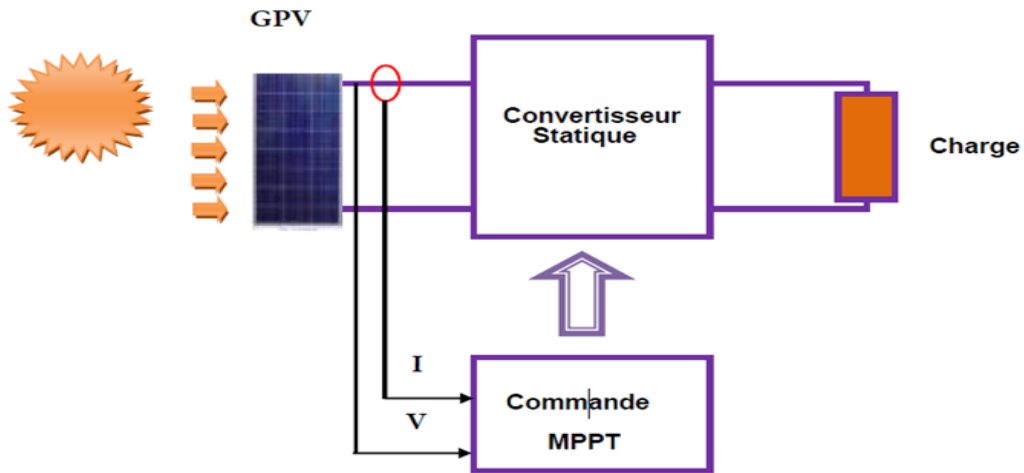


Figure II.10 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque contrôlée par une MPPT [24]

II.2.1. La méthode de perturbation et observation (P&O) :

La méthode de perturbation et d'observation est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque V_{pv} et I_{pv} respectivement. Elle peut déduire le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et la température. Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension V_{pv} volontairement (augmenter ou diminuer) avec une constante C et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du générateur PV. Si la puissance aux bornes des panneaux est augmentée à cause de la perturbation, la perturbation suivante est faite dans la même direction, réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé [49] [50]. Quand le point de puissance maximale est atteint, V_{pv} oscille autour de la valeur optimale ceci cause alors une perte de puissance qui augmente avec le pas d'incrémentement de la perturbation. Si ce pas d'incrémentement est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement [49].

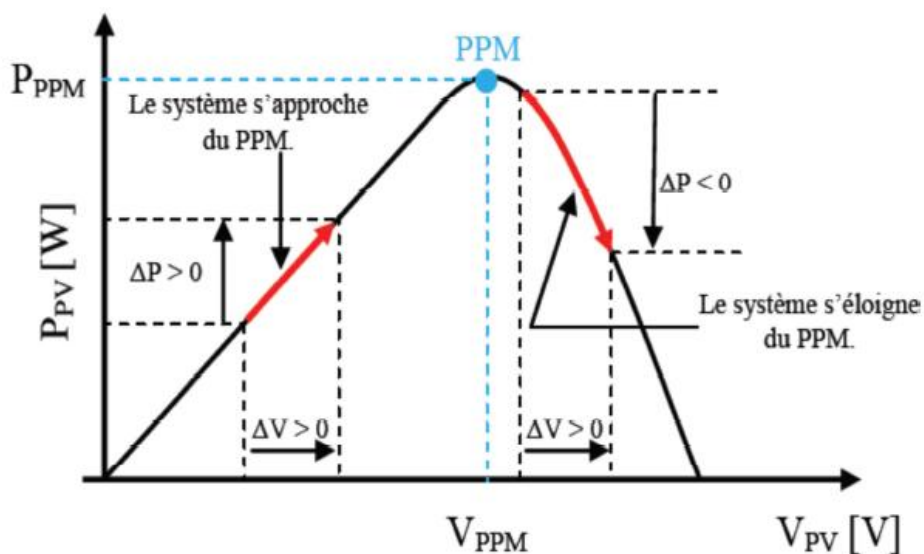


Figure II.11 : Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau solaire

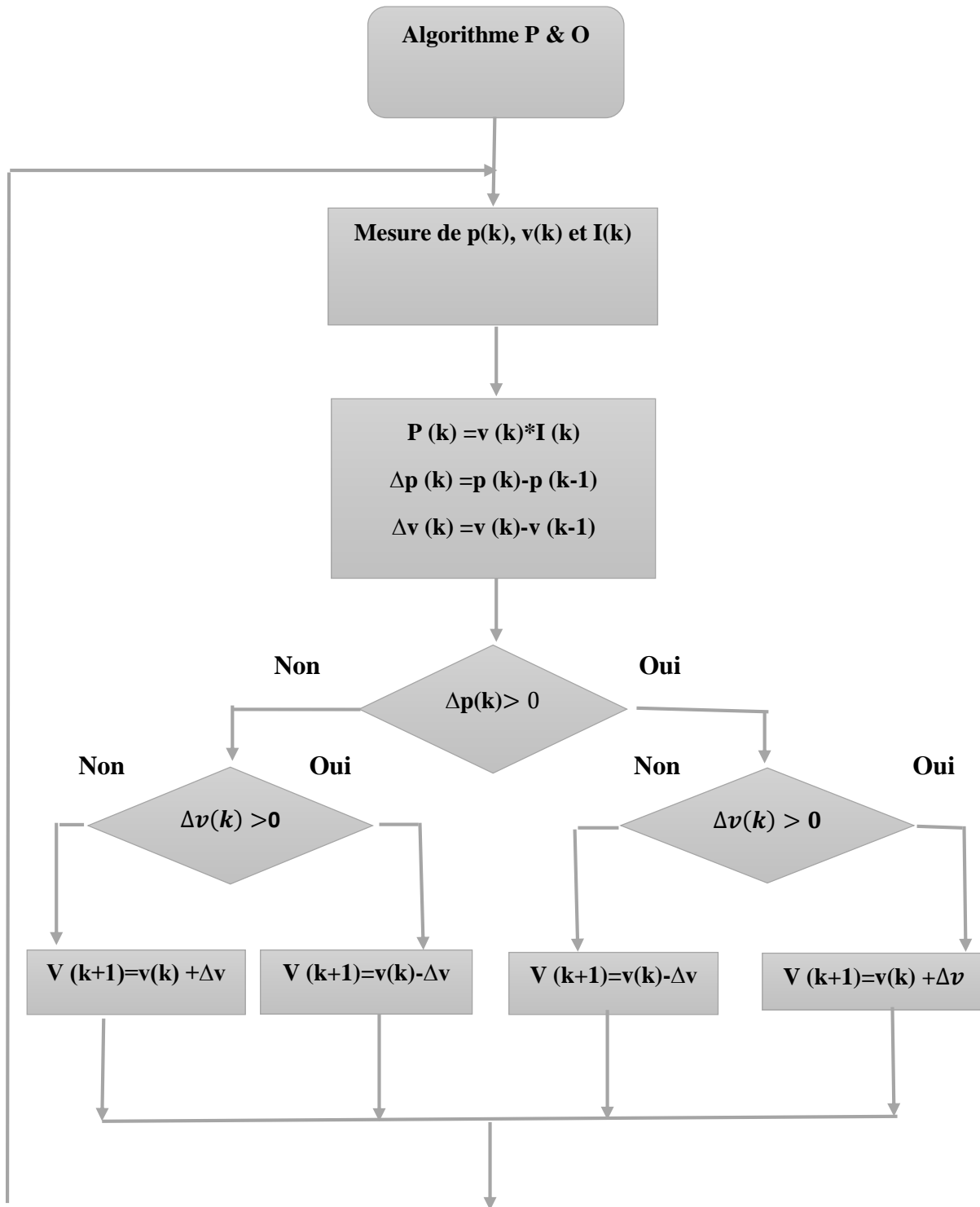


Figure II.12 : diagramme fonctionnel algorithme « perturbation et observation »

II.3. Modélisation du hacheur :

Les convertisseurs statiques DC/DC, appelés aussi hacheurs, sont souvent utilisés dans les systèmes photovoltaïques comme interface d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et sa charge. Ils permettent de commander le flux d'énergie générée par les GPV et d'assurer la poursuite du point de puissance maximale en suivant des stratégies de contrôle spécifiques. Le convertisseur BOOST est un élévateur de tension, la tension de sortie est toujours supérieure à

la tension d'entrée. La figure (II-13) représente la structure d'un hacheur de type BOOST utilisé pour adapter un système photovoltaïque.

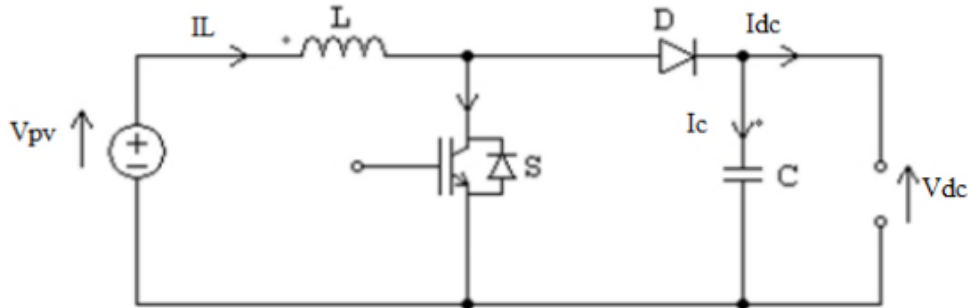


Figure II.13 : Circuit électrique du convertisseur DC-DC (BOOST)

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage T , comporte deux étapes. Lors de la première, on rend l'interrupteur passant (T_r est passant) et la diode polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de 0 à $\alpha.T$ (α rapport cyclique, et compris entre 0 et 1). La tension aux bornes de l'inductance vaut $V_L = V_{pv}$, le courant traversant l'inductance augmente linéairement. Lors de la seconde, on bloque l'interrupteur. La diode devient passante. Cette phase dure de $\alpha.T$ à T . La tension au bornes de l'inductance vaut $V_L = V_{pv} - V_{dc}$, dans cette phase le condensateur C_s se charge en même temps par le courant stocké dans l'inductance et par le générateur [51].

Les équations électriques du hacheur BOOST sont :

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} + (1-\alpha)V_{dc} \quad (12)$$

$$(1-\alpha)I_L = C_S \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad (13)$$

En valeurs moyennes, la tension de sortie est fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique moyen. Son expression est donnée par l'équation (14).

$$V_{dc} = \frac{1}{(1-\alpha)} V_{pv} \quad (14)$$

Et le courant par la relation :

$$I_{dc} = (1-\alpha)I_L \quad (15)$$

La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique.

II.4. Application et simulation de la méthode perturbation et observation (P&O) sur un panneau photovoltaïque :

La figure (II.14) représente Schéma d'un système photovoltaïque en Matlab/Simulink, Il est constitué d'un panneau photovoltaïque de type PV SM110 de 110W, un hacheur BOOST ainsi la commande MPPT.

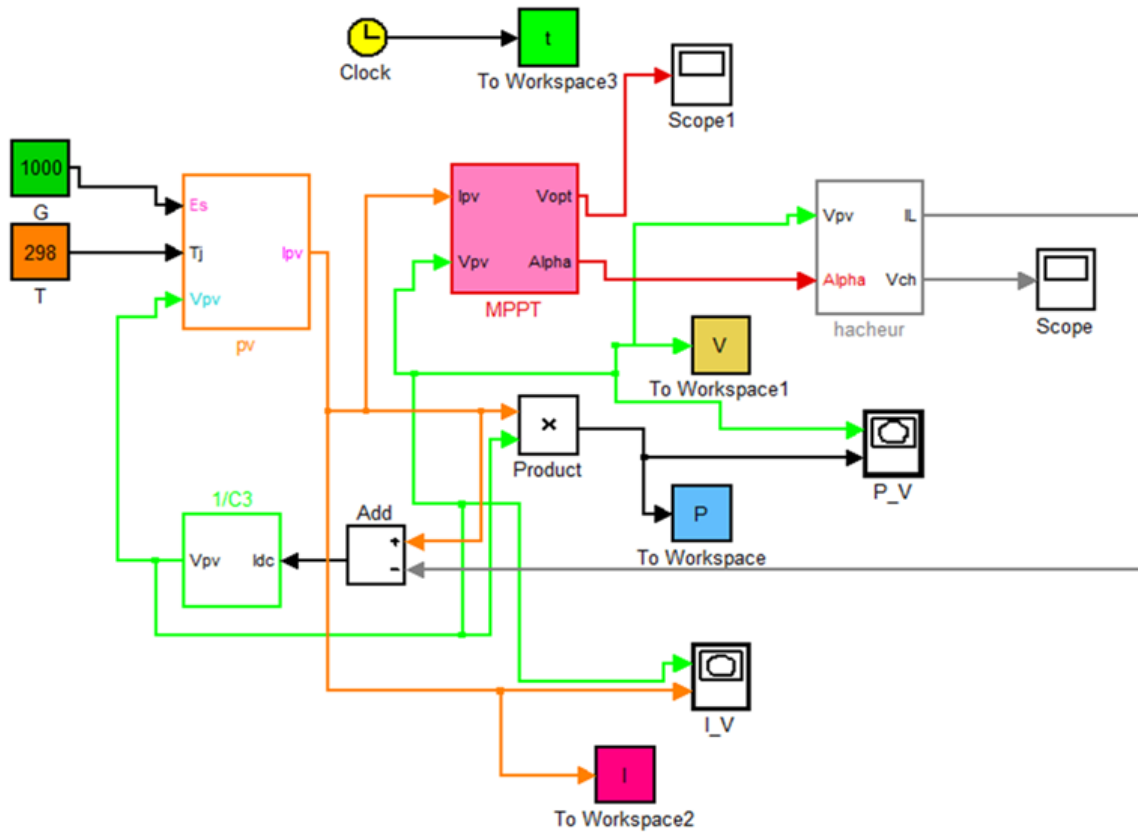


Figure II.14 : Schéma d'un système photovoltaïque en MATLAB/SIMULINK

Nous présentons ci-dessous les résultats de simulation (sous Matlab/Simulink), du notre système photovoltaïque avec l'application de l'algorithme P&O.

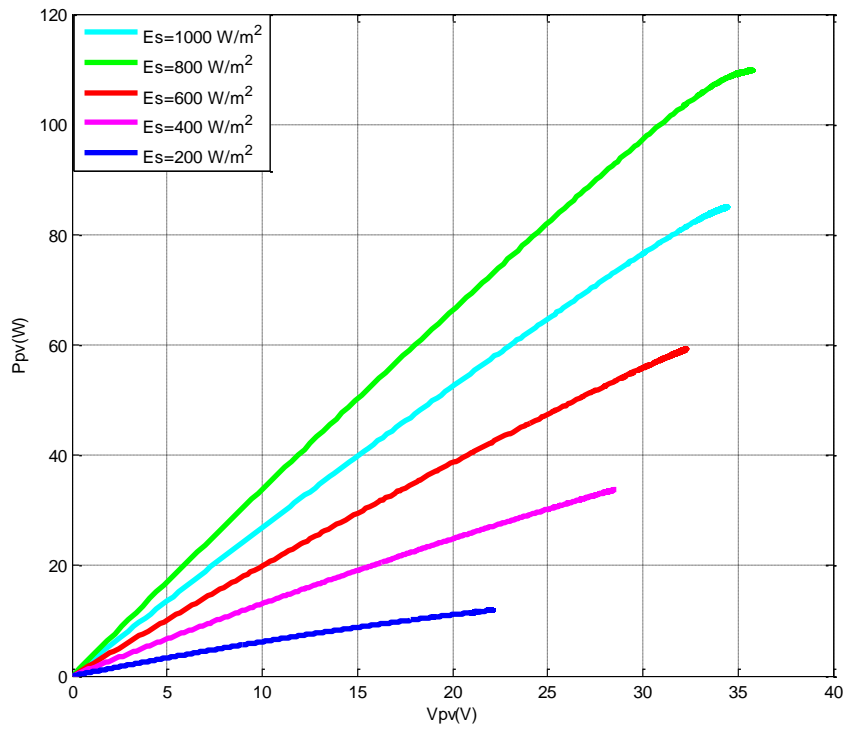


Figure II.15 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ avec optimisation par la PO

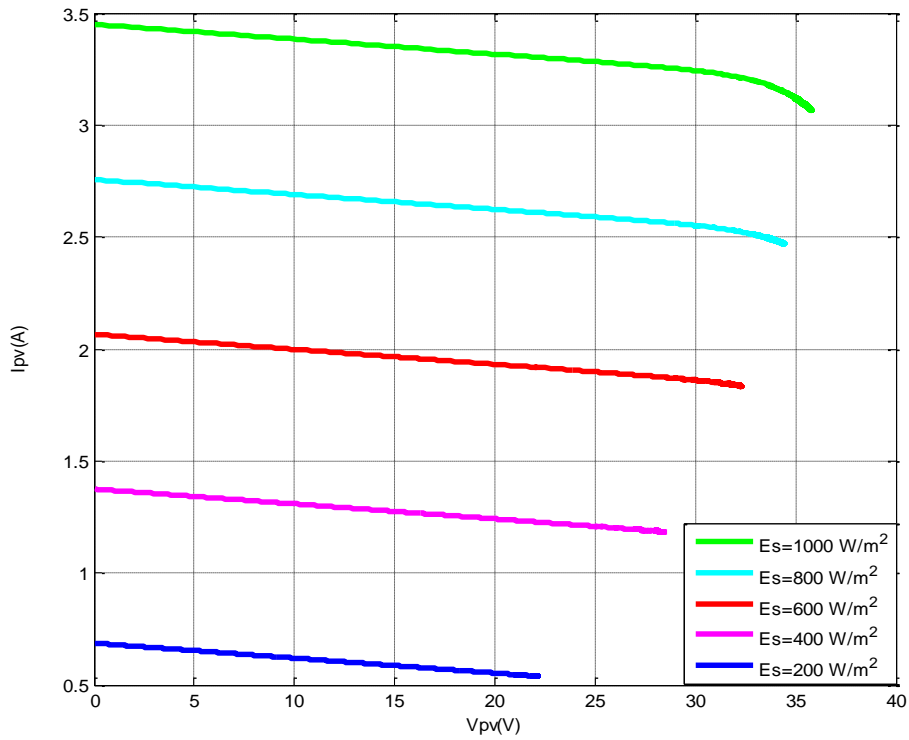


Figure II.16 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ avec optimisation par la PO

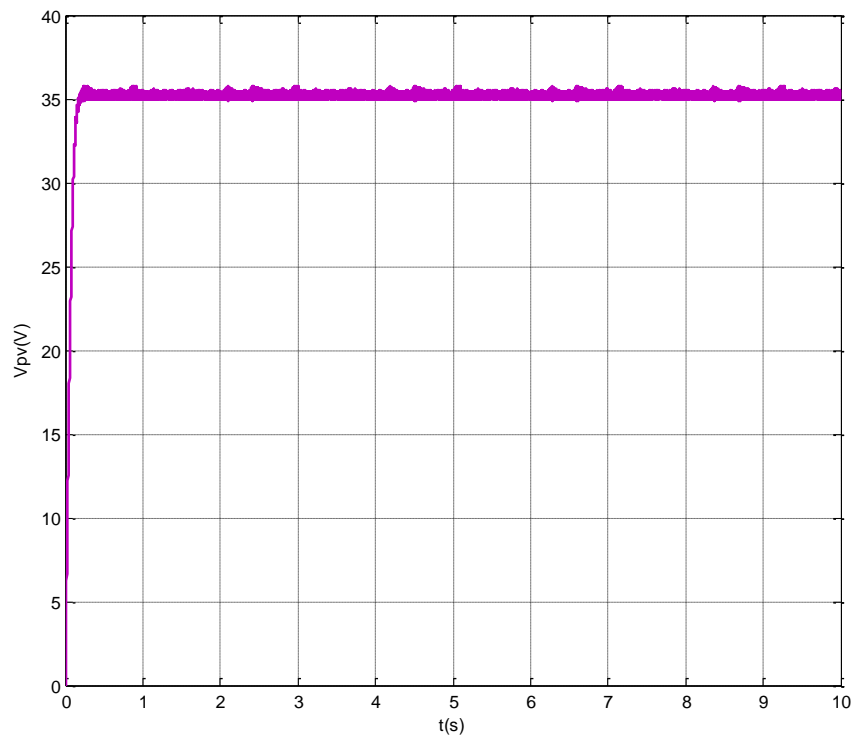


Figure II.17 : Allure de la tension du PV sous les conditions ($1000\text{W}/\text{m}^2$, $T_a=25^\circ\text{C}$)

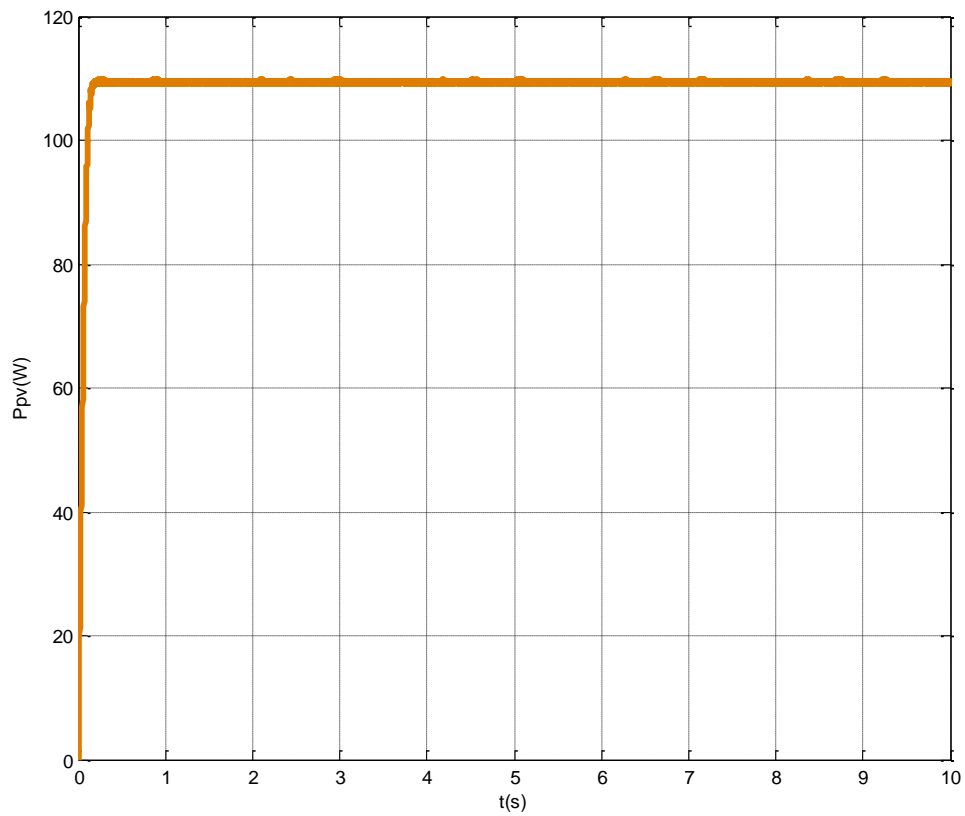


Figure II.18 : Allure de la puissance du PV sous les conditions ($1000\text{W}/\text{m}^2$, $T_a=25^\circ\text{C}$)

D'après les résultats de simulations des figures (II.15) et (II.16) on remarque bien que quand le point de puissance et de courant maximal est atteint, la commande MPPT maintien le point de fonctionnement, la tension et la puissance convergent vers un point qui correspond à la valeur de la puissance maximal selon les figures (II.17) et (II.18). On constate aussi que la méthode perturbation et d'observation (P&O) présente des oscillations en régime permanent suit à la perturbation continue de la tension de fonctionnement et ça causera des pertes de puissance, mais cette méthode reste toujours efficace vu sa simplicité et aussi son coût par rapport aux autres techniques d'MPPT.

Conclusion :

La modélisation de chaque composant du système photovoltaïque complet a été élaborée à partir de modèles de la littérature (champ PV et convertisseur DC-DC) ; cette modélisation est une étape essentielle qui permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres des constituants.

L'implémentation de ces modèles dans un environnement de simulation adapté permettra d'étudier le comportement des composants en fonction de certains paramètres.

Chapitre III

Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent

III. Introduction :

Dans ce chapitre on présente la modélisation de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) pour le fonctionnement d'un moteur dans le repère de Park lié au champ tournant, la modélisation de l'alimentation triphasée de la machine qui permettra l'application des commandes destinées au contrôler le flux énergétique générées, et la modélisation de la pompe centrifuge.

III.1.Machine synchrone a aiment permanent :

La machine synchrone à aimants permanents est un dispositif électromécanique qui comprend un stator et un rotor. Le stator est une partie fixe où se trouvent les enroulements liés à la source. Le rotor est une partie mobile qui est monté sur l'axe de rotation [31].

III.1.1.Principe de fonctionnement de la MSAP :

Toute machine électrique dans laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé machine synchrone. Pour l'obtention d'un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique doit être généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. Cela dit, qu'en mode permanent la position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ceci impose une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique [32].

III.1.2.La modélisation de la MSAP :

- **Mise en équations de la machine synchrone à aimants permanentes :**

Le schéma représentatif de la machine à modéliser est donné par la figure (III.1)

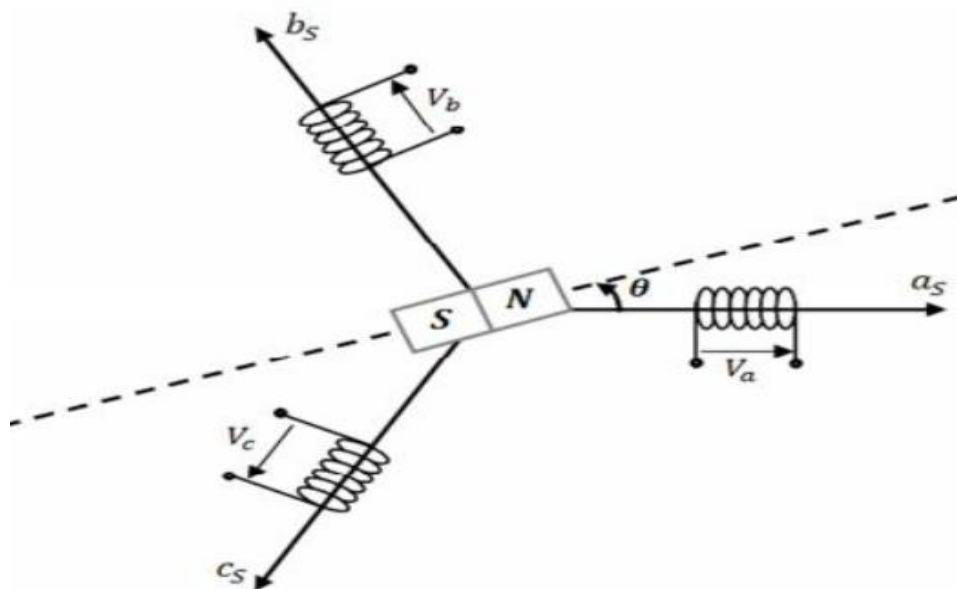


Figure.III.1 : schéma représentatif de la MSAP à modéliser

- Au stator : trois enroulements a, b, c décalés entre eux de $2\pi/3$ électriques
- Au rotor : un inducteur à aimants permanents.

III.1.2.1. Equations éclectiques et magnétiques de la machine :

III.1.2.1.1. Equations éclectique :

$$\begin{cases} v_a = R_s \cdot i_a + \frac{d\varphi_a}{dt} \\ v_b = R_s \cdot i_b + \frac{d\varphi_b}{dt} \\ v_c = R_s \cdot i_c + \frac{d\varphi_c}{dt} \end{cases} \quad (16)$$

III.1.2.1.2. Equations magnétique :

Pour la phase a ; on a :

$$\varphi_a = \varphi_{aa} + \varphi_{ba} + \varphi_{ca} + \varphi_{fa} \quad (17)$$

$$\varphi_a = L_s i_s + M_s i_b + M_s i_c + \varphi_{fa} \quad (18)$$

$$\varphi_a = (L_s - M_s) i_a + \varphi_{fa} \quad (19)$$

On prend $L_c = L_s - M_s$

Donc : $\varphi_a = L_c i_a + \varphi_{fa}$

Avec :

φ_{aa} : Flux propre de la phase a ;

$\varphi_{ba}, \varphi_{ca}, \varphi_{fa}$: Flux mutuels créés par les phases b, c, et l'inducteur dans la bobine a ;

L_s : Inductance propre statorique ;

M_s : Inductances mutuelles entre deux phases du stator ;

L_c : Inductance cyclique

R_s : Résistance de l'enroulement statorique

Ce qui nous permet d'écrire les équations des autres phases comme suit :

$$\begin{cases} \varphi_a = L_c i_a + \varphi_{fa} \\ \varphi_b = L_c i_b + \varphi_{fb} \\ \varphi_c = L_c i_c + \varphi_{fc} \end{cases} \quad (20)$$

Les systèmes d'équations triphasées (16) et (20) peuvent se mettre sous une forme matricielle :

$$[v_s] = [R_s] \cdot [i_s] + \frac{d[\varphi_s]}{dt} \quad (21)$$

$$[\varphi] = [L]. [I] \quad (22)$$

$$[v_s] = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} : \text{vecteur tensions statoriques}$$

$$[i_s] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} : \text{vecteur courants statorique}$$

$$[\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} : \text{vecteur flux statoriques}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} : \text{représente la matrice des inductances statoriques}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} : \text{représente la matrice des résistances statoriques}$$

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère.

Cette transformation mathématique. Transforme les trois bobines statoriques déphasées de $(2\pi/3)$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$ et situées sur le rotor.

III.1.2.1.3. Equations mécanique :

L'équation électromécanique est exprimée par :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d}{dt} \Omega + F \Omega \quad (23)$$

C_{em} : Couple électromagnétique ;

C_r : Couple résistant [N.m] ;

J : Moment d'inertie de la partie tournante ;

Ω : vitesse angulaire mécanique du rotor ;

F : Coefficient de frottement visqueux ;

III.1.2.1.4. Couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique est dû à l'interaction de deux champs tournants.

Le champ tournant rotorique créé par les aimants permanents et le champ tournant produit les courant sinusoïdaux qui parcourant les enroulements du stator. Sa forme générale est donnée par :

$$C_{em} = \frac{1}{2} [I]^t \left\{ \frac{d[L]}{d\theta} \right\} [I] \tag{24}$$

En introduisant le vecteur courant et la matrice des inductances par leurs expressions ; et après simplification, on obtient :

$$C_{em} = p\phi_f I_q \tag{25}$$

III.1.2.1.5. Ecriture des équations électriques et magnétiques dans le repère de Park :

Il existe plusieurs transformations ayant pour objectif la simplification des équations de la machine en les rendant plus facile à résoudre numériquement. Parmi ces transformations, la transformée de Park qui consiste à remplacer les enroulements triphasés (a, b, c) par deux enroulements d et q (figure III.2).

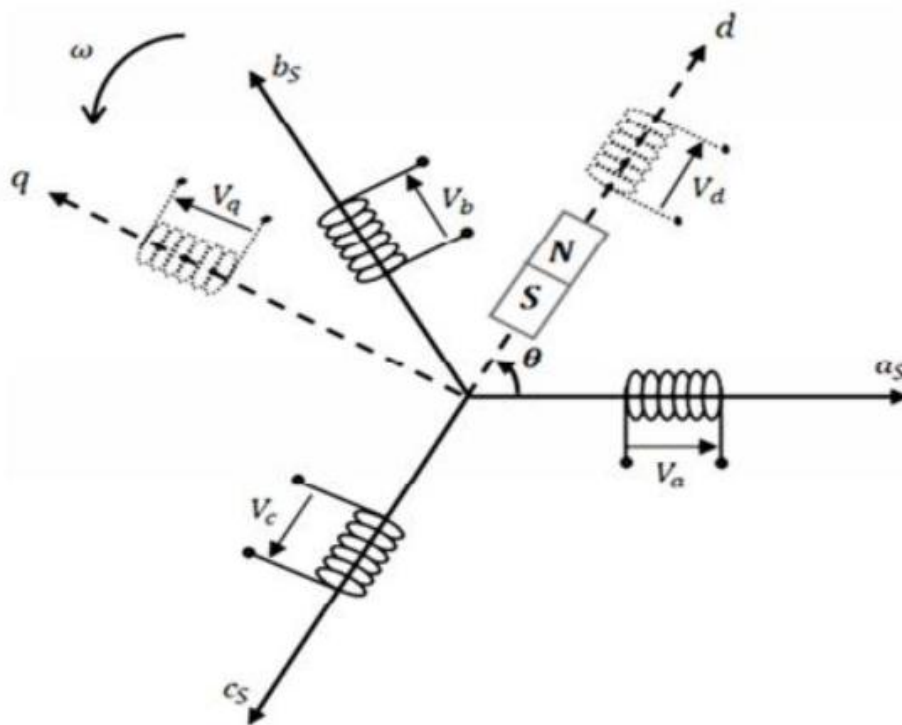


Figure III.2 : schéma équivalent de la MSAP du repère (d, q)

Les axes (d, q) sont liés au rotor et tourne avec lui. Ainsi les grandeurs réelles (tension, courant ou flux) sont liées aux grandeurs de Park par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = [p(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (26)$$

Avec :

[p(θ)]: la matrice de Park qui conserve les puissances et qui assure le changement de variable. Elle donnée par l'écriture matricielle suivante :

$$p(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (27)$$

Les équations de la MSAP dans le repère de Park sont :

$$\begin{cases} v_d = R_s \cdot i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega\varphi_q \\ v_q = R_s \cdot i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega\varphi_d \end{cases} \quad (28)$$

Sachant que :

$$\varphi_d = L_c \cdot i_d + \varphi_{fd} \quad (29)$$

$$\varphi_q = L_c \cdot i_q \quad (30)$$

Le système d'équations (28) devient :

$$\begin{cases} v_d = R_s \cdot i_d + L_c \frac{di_d}{dt} - L_c i_q \omega \\ v_q = R_s \cdot i_q + L_c \frac{di_q}{dt} + \omega(L_c \cdot i_d + \varphi_{fd}) \end{cases} \quad (31)$$

Le dernier système obtenu décrit le schéma équivalent de la MSAP dans le repère de Park (figure III.2), identique à celui d'une machine à courant continu ayant comme inducteur l'enroulement (f) et deux induits en quadrature.

III.2. Convertisseur statique :

Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou batteries pour l'adopter à des récepteurs fonctionnant soit en tension continue différente, soit en tension alternative [21].

III.2.1. Modélisation d'onduleur de tension :

L'onduleur utilisé dans ce système est un onduleur de tension triphasé à six interrupteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture ; ce sont des transistors de types IGBT auxquels sont placés des diodes en antiparallèle. L'onduleur est alors constitué de trois bras, dont les deux interrupteurs de chaque bras conduisent de manière complémentaire. Les séquences de

commutation des interrupteurs sont fonction de la commande à utiliser (commande en pleine onde, commande en MLI « Modulation de Largeur d'Impulsion », commande à hystérésis).

La structure de l'onduleur triphasé est représentée en figure (III.3).

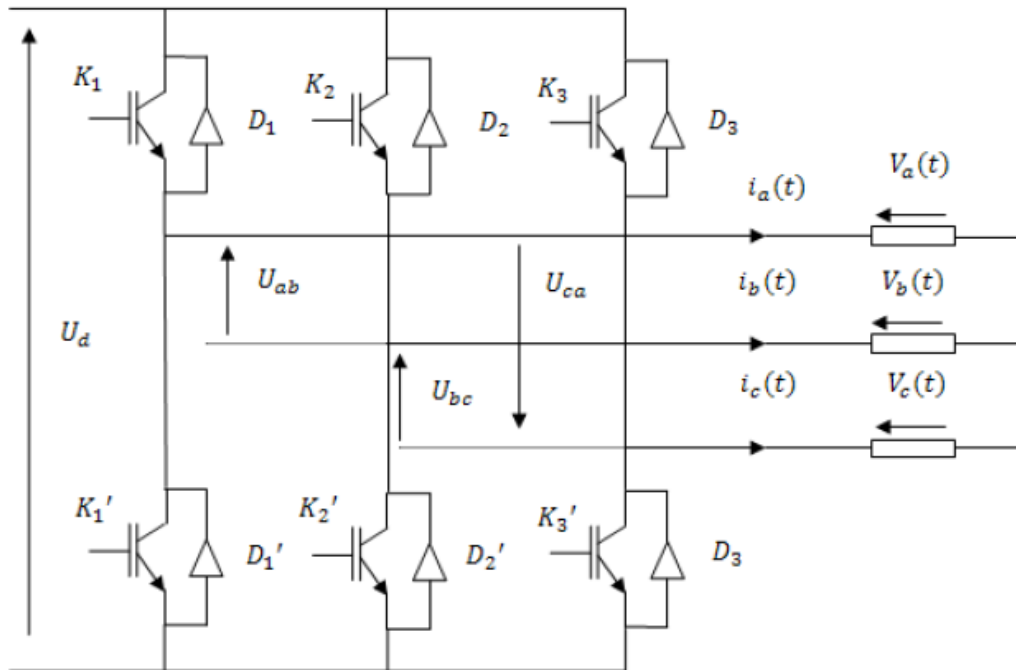


Figure III.3 : Schéma d'un onduleur de tension [29]

L'onduleur est modélisé en associant à chaque bras une fonction logique F qui détermine son état de conduction :

$$F1 = \begin{cases} 1 & \text{si } k1 \text{ fermé et } k'1 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } k'1 \text{ fermé et } k1 \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$F2 = \begin{cases} 1 & \text{si } k2 \text{ fermé et } k'2 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } k'2 \text{ fermé et } k2 \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$F3 = \begin{cases} 1 & \text{si } k3 \text{ fermé et } k'3 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } k'3 \text{ fermé et } k3 \text{ ouvert} \end{cases}$$

Ainsi les tensions de ligne sont données par :

$$u_{ab} = v_a - v_b = u_d(F_1 - F_2) \tag{32}$$

$$u_{bc} = v_b - v_c = u_d(F_2 - F_3) \tag{33}$$

$$u_{cb} = v_c - v_b = u_d(F_3 - F_1) \tag{34}$$

Dans l'hypothèse on a les tensions v_a, v_b, v_c forment un système de tensions triphasée équilibrées alors de(32)-(34) en trouve :

$$v_a = \frac{u_d}{3}(2F_1 - F_2 - F_3) \tag{35}$$

De (32) et (33) on trouve :

$$v_b = \frac{u_d}{3} (2F_2 - F_1 - F_3) \quad (36)$$

De (33) et (34) on trouve :

$$v_c = \frac{u_d}{3} (2F_3 - F_1 - F_2) \quad (37)$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{u_d}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (38)$$

III. 3. Principe de la commande vectorielle :

Le principe de la commande vectorielle est identique à celui de la commande d'une machine à courant continu à excitation séparée. Il faut cependant se placer dans un repère particulier où le couple électromagnétique s'exprime simplement en fonction des composantes des courants suivant les deux axes (axe d et axe q). Habituellement, la composante d'axe ' d ' du courant statorique joue le rôle de l'excitation et permet de régler la valeur du flux dans la machine. La composante d'axe ' q ' joue le rôle du courant d'induit et permet de contrôler le couple. La stratégie de commande la plus souvent utilisée est celle qui consiste à maintenir le courant i_d à une valeur nulle. Cette stratégie permet de simplifier la commande du couple par linéarisation de la relation entre le couple et le courant. Si le courant i_d est maintenu nul, physiquement le flux de réaction d'induit est en quadrature avec le flux rotorique produit par les aimants permanents et $\varphi_d = \varphi_f$ l'expression du couple deviennent :

$$Cem = \frac{3}{2} p [(L_d - L_q) i_d i_q + \varphi_f i_q] \quad (39)$$

Dans notre machine $L_d = L_q$, ce qui nous donne :

$$Cem = \frac{3}{2} p \varphi_f i_q \quad (40)$$

Comme le flux φ_f est constant, le couple électromagnétique est directement proportionnel à i_q

Donc :

$$Cem = K i_q \quad (41)$$

$$\text{Tel que : } K = \frac{3}{2} p \varphi_f$$

Les équations de tension de la machine dans ce cas est :

$$\begin{cases} V_d = -\omega L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega \varphi_f \end{cases} \quad (42)$$

III.4.Régulateur PID :

Un régulateur *PID* remplit essentiellement trois fonctions :

- Il fournit un signal de commande $U(t)$ en tenant compte de l'évolution du signal de sortie $S(t)$ par rapport à la consigne $E(t)$.
- Il élimine l'erreur statique grâce au terme intégrateur.
- Il anticipe les variations de la sortie grâce au terme dérivateur.

La sortie d'un régulateur PID, égale à l'entrée de commande de la centrale, dans le domaine temporel est la suivante :

$$S(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (43)$$

Avec :

$\varepsilon(i)$: Représente l'erreur de suivi, la différence entre la valeur d'entrée désirée (v) et la sortie réelle(s) ;

$e(t)$: Signal de commande.

K_p : Gain Proportionnel.

K_i : Gain Intégral.

K_d : Gain Dérivative ;

La fonction de transfert d'un régulateur PID est donnée par la relation suivante.

$$S(P) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d S \quad (44)$$

III. 5. Simulation de la machine synchrone à aimant permanent avec la commande vectoriel :

Après la modélisation de l'ensemble machine onduleur on a abouti au schéma bloqué de la figure (III.4) à l'aide de Matlab_Simulink.

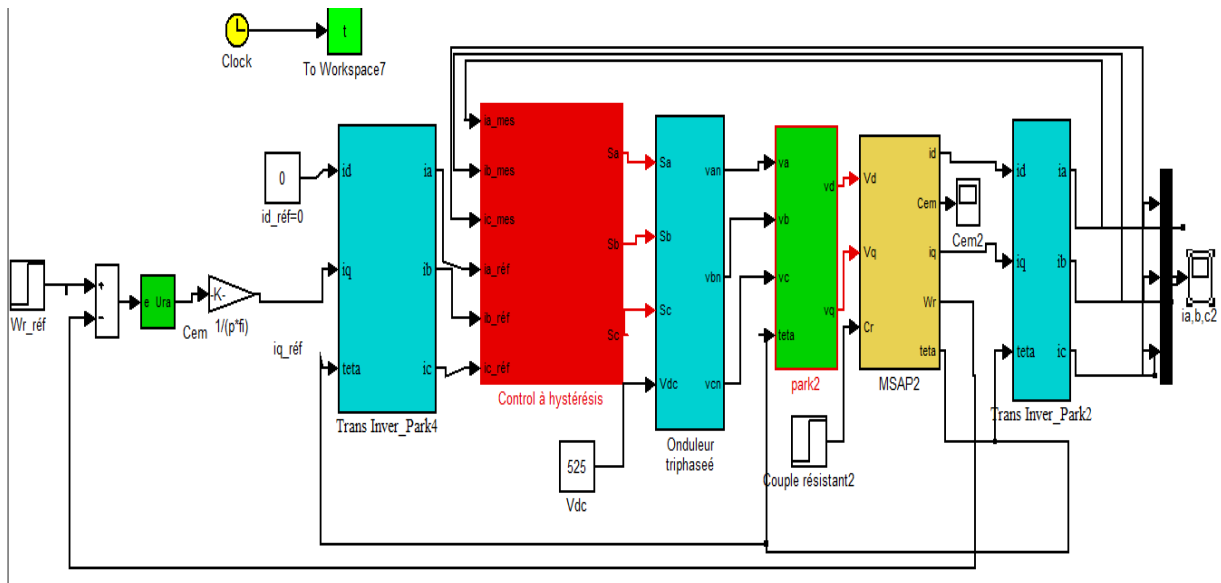


Figure III.4 : Schéma bloc de la commande vectorielle de la machine synchrone à aimant permanent

On impose une vitesse de référence 105 rad/s à l'entrée de l'onduleur et un couple de charge de 10 (N.m) à $t=4$:

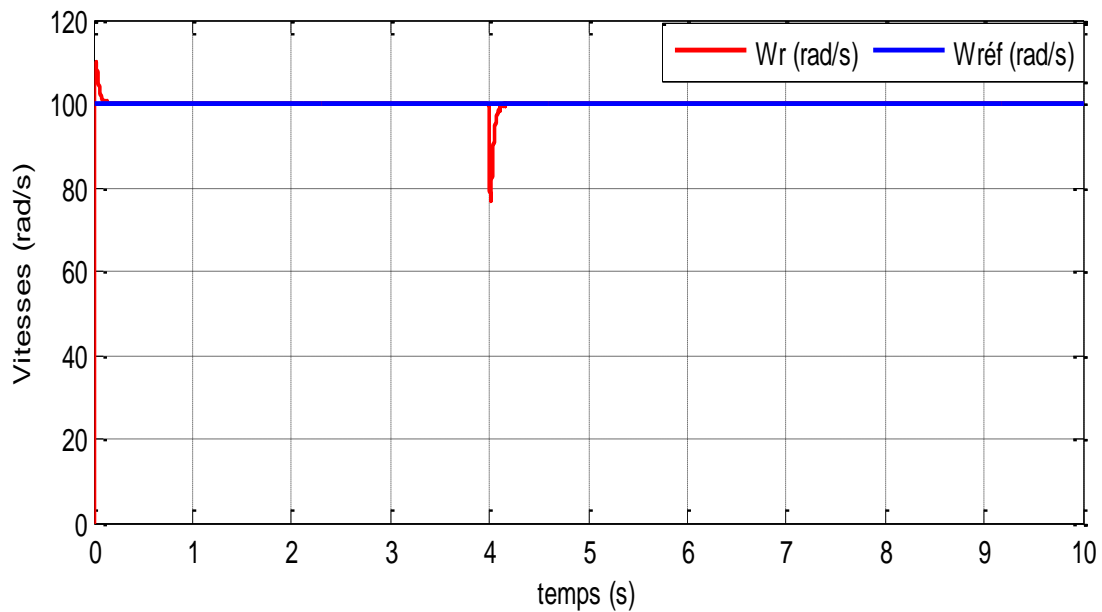


Figure III.5 : L'allure de la vitesse de rotation et de référence en fonction du temps

L'allure de la vitesse suit sa référence avec un dépassement pendant le régime transitoire

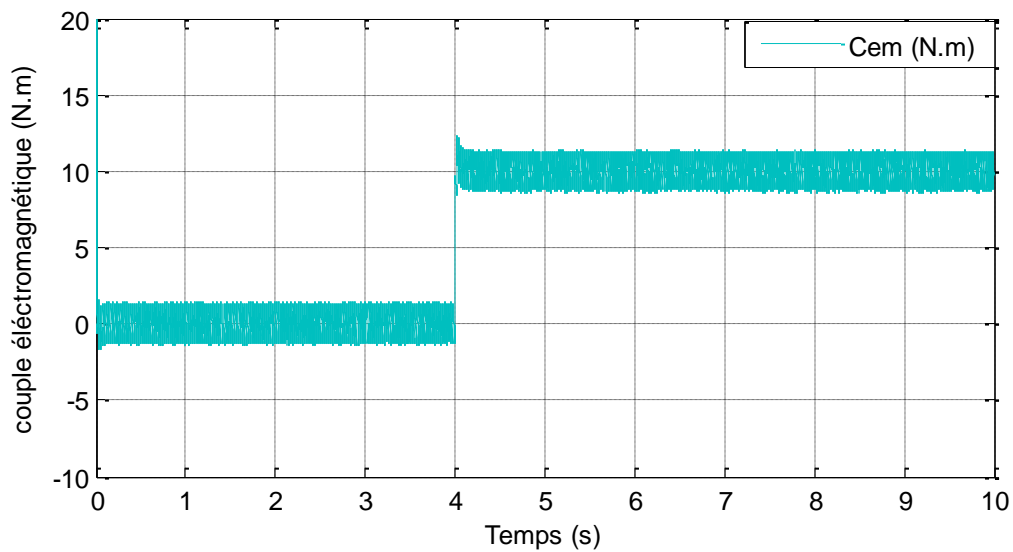


Figure III.6 : couple électromagnétique en fonction du temps

Le couple électromagnétique suit parfaitement la variation du couple résistant, qui prend une valeur presque nul dans l'intervalle de temps [0 4] s et est égale à la valeur du couple résistant après l'application de la charge à $t=4$ s.

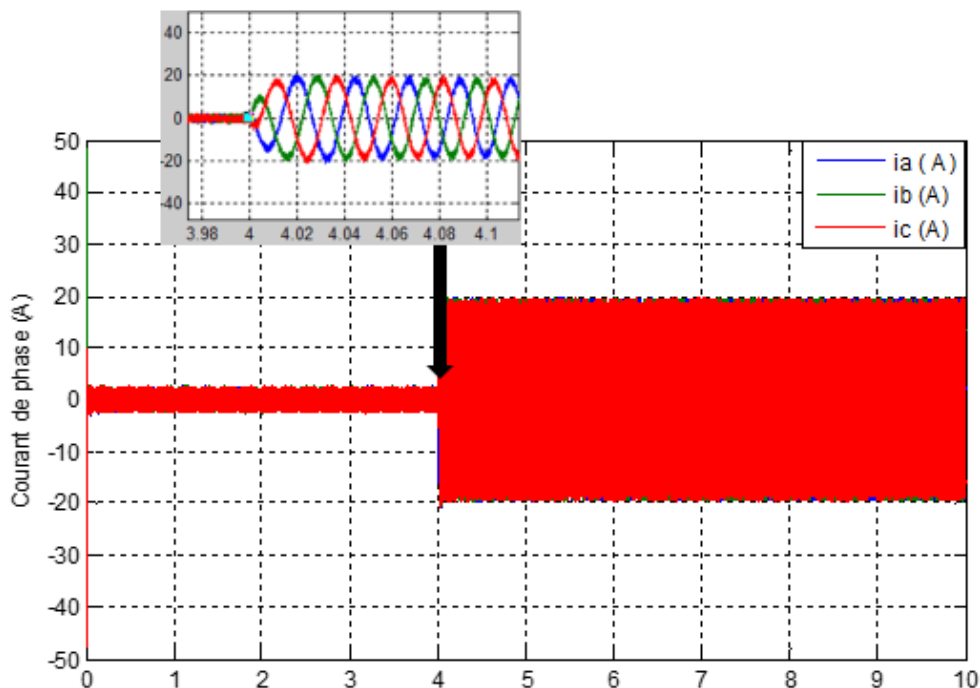


Figure III.7 : courants statoriques en fonction de temps

Les courants statoriques sont de forme sinusoïdale avec présence des harmoniques.

En appliquant un couple de charge de 10N.m à $t= 4$ s on remarque une augmentation des courants qui correspond à leurs valeurs nominales.

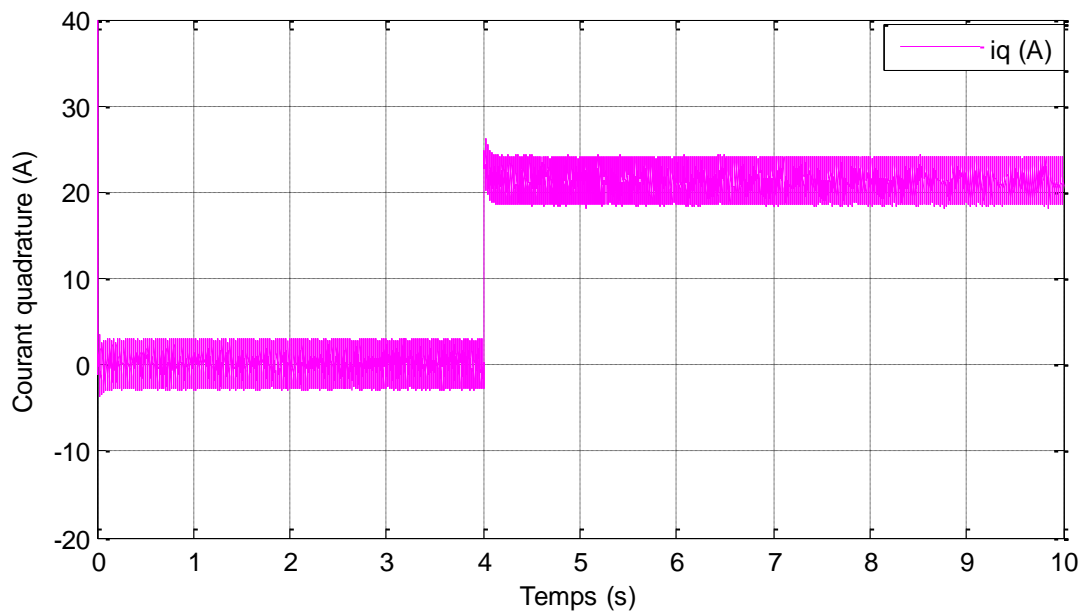


Figure III.8 : courant quadrature en fonction du temps

Le courant de quadrature suit la variation du couple résistant tel qu'il augmente lorsqu'on applique un couple de charge de 10N.m à 4s.

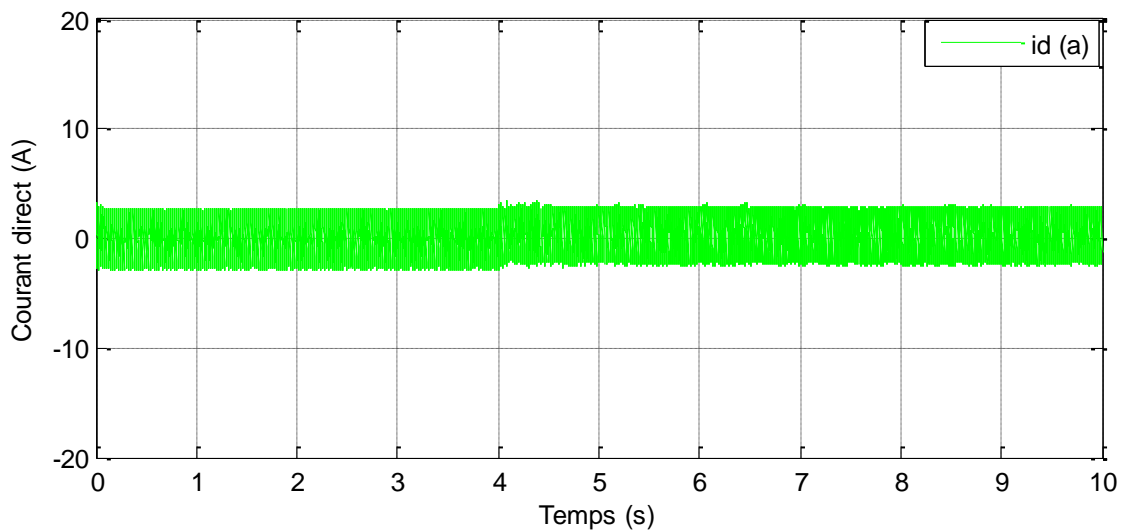


Figure III.9 : courant direct en fonction du temps

Le courant direct suit sa référence qui est égale à zéro avec une légère augmentation pendant l'application de la charge à $t=4$ s.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation et la simulation de la machine synchrone à aimant permanent piloté par la commande vectorielle et alimenté par un onduleur triphasé à commande à hystérésis.

La commande vectorielle permet d'avoir une dynamique proche de celle de la machine à courant continu à excitation séparée, autrement dit, une dynamique asymptotiquement linéaire. Cependant, cette structure de commande nécessite que les paramètres de la machine soient précis. Ceci exige une bonne identification des paramètres. En conséquence, le recours à des algorithmes de commande robuste, pour maintenir un niveau de découplage et de performance acceptable, est nécessaire.

Enfin nous avons présenté les résultats de simulation numérique des paramètres (MSAP-Commande vectorielle) et leur interprétation qui montrent une bonne poursuite de la vitesse et du couple aux valeurs de références correspondantes. Aussi, nous avons constaté que les erreurs de poursuite sont relativement faibles et le découplage entre les deux grandeurs de contrôle est toujours maintenu.

Chapitre IV

*Dimensionnement du
pompage photovoltaïque*

IV. Introduction :

Pour réaliser une simulation d'une chaîne de pompage photovoltaïque proche de la réalité, il faut dimensionner tous les éléments constituant de la chaîne, en tenant compte des besoins énergétiques, énergie solaire disponible, et d'autres paramètres importants. Dans la première partie de ce dernier chapitre, on va présenter la modélisation de la pompe centrifuge et une méthode de dimensionnement, alors que dans la deuxième partie, une simulation de l'association des éléments de la chaîne sous l'outil Matlab / Simulink 2012 va être réalisée.

IV.1.Pompe centrifuge :

Les pompes centrifuges sont les plus rencontrées dans le domaine du pompage d'eau. Elles sont couplées avec les moteurs asynchrones constituant un groupe électropompe.

IV.1.1. Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge :

La pompe centrifuge transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou d'ailettes. L'eau entre au centre de la pompe et est poussée vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force centrifuge des aubages. Le mouvement du liquide résulte de l'accroissement d'énergie qui lui est communiqué par la force centrifuge. La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique (HMT) relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. On utilise habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres) [40].

IV.1.2.Modélisation de la pompe centrifuge :

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu 3 paramètres, la hauteur, le débit et la vitesse ayant pour équation :

$$F(H, Q, W) = 0 \quad (45)$$

Pour résoudre ce système d'équation, on considère l'un des 3 paramètres constant, en générale c'est la vitesse qui est constante.

La hauteur totale du pompage est la somme de la hauteur statique et la hauteur dynamique.

$$H = H_s + H_d \quad (46)$$

H : Hauteur totale du pompage.

H_s : Hauteur statique qui est la distance entre le niveau statique de l'eau dans le puits jusqu'au le point le plus élevées auquel on doit pomper l'eau.

H_d : Est la somme des pertes linéaires et singulières

Ces pertes sont :

IV.1.2.1. Les pertes de charge :

Représentent les pertes de pression dues aux différents obstacles s'opposant au déplacement du fluide pompé. On distingue :

IV.1.2.1.1. Les pertes de charge linéaires :

Produites par le frottement du fluide sur les parois des conduites .Elles sont données par la formule suivante :

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2.g} \tag{47}$$

λ : Coefficient de pertes de charges linéaires.

L : Longueur de la tuyauterie (m).

D : Diamètre de la tuyauterie (m).

G : Accélération de la pesanteur (m/s²).

v : Vitesse moyenne du fluide (m/s) qui est donnée par :

$$v = \frac{4.Q}{\pi D^2} \tag{48}$$

Q : debit (m³/s).

$$\Delta H_1 = \lambda \frac{L}{D} \left(\frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \right) \tag{49}$$

On remarque que les pertes de charges linéaires sont proportionnelles à la longueur de canalisation, ces pertes diminuent quand on augmente le diamètre de la canalisation.

IV.1.2.1.2. Les pertes de charge singulières :

Produites par tout phénomène local tel que changement de section ou de direction dans la conduite, vanne,...etc. Elles sont données par la formule suivante :

$$\Delta H_2 = \varepsilon \cdot \frac{v^2}{2.g} = \varepsilon \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \tag{50}$$

ε : Coefficient de pertes de charges locales.

La hauteur dynamique est la somme des deux pertes :

$$H_d = \Delta H_1 + \Delta H_2$$

$$H_d = \left(\lambda \frac{L}{D} + \varepsilon \right) \cdot \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} = K_{fr}. Q^2 \tag{51}$$

K_{fr} : Constante de la canalisation.

La hauteur totale de pompage est :

$$H_d = H_s + K_{fr} \cdot Q^2 \quad (52)$$

IV.1.2.1.3. Couple résistant :

$$C_r = K_p \omega^2 \quad (53)$$

Tel que :

$$K_p = \frac{P_u}{\omega_n^3}$$

IV.2. Dimensionnement du système de pompage photovoltaïque :

IV. 2.1. Données de base :

Les données suivantes seront nécessaires pour dimensionner la pompe solaire et ses composants. Nous donnerons une définition des données utilisées en pompage en général et nous expliquerons la particularité du pompage photovoltaïque.

IV.2 .1 .1. Débit :

Le débit d'eau de la pompe et la quantité d'eau que la pompe peut fournirai durant un intervalle de temps donne. Le débit est donné en litre par heure (l/h) ou en mètre cube par jour (/h).

IV. 2. 1. 2. Hauteur manométrique totale :

La hauteur manométrique totale (HMT) est la différence de pression en mètre de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement, elle peut être calculée comme suite :

$$HMT = H_g + P_c \quad (54)$$

Avec :

- H_g : hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée (niveau dynamique) et le plan d'utilisation.
- P_c : pertes de charge produites par le frottement d'eau sur les parois des conduites (L), de leur diamètre (d_c) et de débit de la pompe (Q) et s'expriment en mètre de colonne d'eau. Le diamètre des conduites doit être calculé afin que les pertes de charge correspondent au plus à 10% de la hauteur géométrique totale

IV.2 .1 .3. Niveau statique :

Le niveau statique d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau avant pompage.

IV. 2. 1. 4. Niveau dynamique :

Le niveau dynamique d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau pour un pompage à un débit donné. Pour le calcul de la HMT, le niveau dynamique est calculé pour un débit moyen. La différence entre le niveau dynamique et le niveau statique est appelée rabattement.

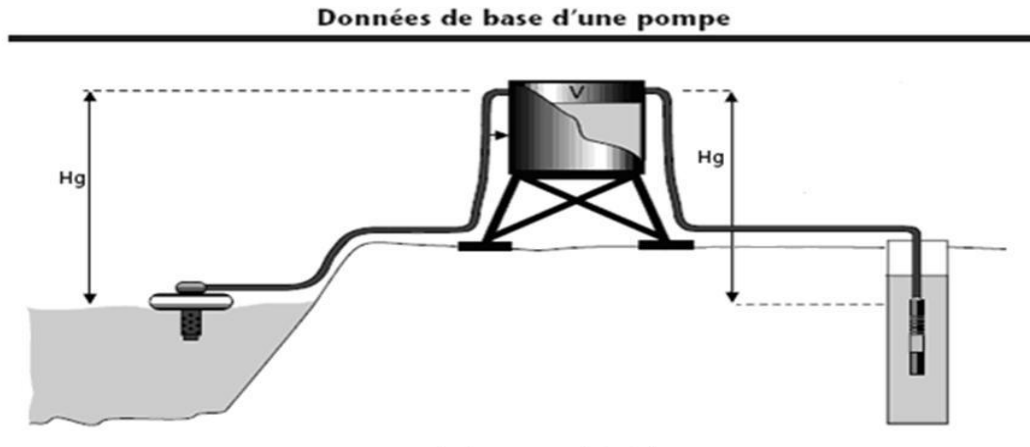


Figure IV.1 : les données de base d'une pompe

IV. 2. 2. Méthode de dimensionnement :

Les différentes étapes pour le dimensionnement d'un système de pompage sont :

- Evaluation des besoins en eau.
- Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire.
- Détermination de l'énergie solaire disponible.
- Choix des composants.

IV. 2. 2. 1. Evaluation des besoins en eau :

La détermination des besoins en eau pour la consommation d'une population donnée dépend essentiellement de son mode de vie. Les besoins en eau que l'on estime nécessaires pour les zones rurales des pays pauvres sont de l'ordre de 20 litres par personne et 30 litres par tête de bétail. Les besoins d'eau pour l'irrigation dépendent du type de culture, des facteurs météorologiques comme la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol, la saison de l'année considérée et de la méthode d'irrigation. Cependant, il est important de se baser sur la pratique et l'expérience locale. La capacité du réservoir sera déterminée selon les besoins en eau journaliers et l'autonomie requise du système.

Dans ce travail, on choisit un débit de remplissage nominal $Q = 0.0019m^3/S$ et une hauteur manométrique totale $HMT = 30$ m. Ces calculs permettent de dimensionner le générateur photovoltaïque, le régulateur et le moteur envisageables à cette application.

IV. 2. 2. 2. La puissance hydraulique :

La puissance hydraulique nécessaire pour déplacer l'eau d'un point à un autre point est donnée par :

$$P_h = \rho \cdot g \cdot HMT \cdot q \quad (55)$$

Avec :

g : Accélération de la pesanteur (9.81 m/s^2).

HMT : La hauteur manométrique totale que doit convaincre la pompe (m).

Q : Débit volumétrique (m^3/h).

ρ : La masse volumétrique d'eau (1000 Kg/m^3).

IV. 2. 2. 3. La puissance utile du moteur :

La puissance utile du moteur en fonction de la puissance hydraulique de la pompe est comme suivante :

$$P_u = \frac{P_h}{\eta_p} \quad (56)$$

IV. 2. 2. 4. La puissance absorbée :

La puissance absorbée par le moteur dépend de la puissance utile P_u , et du rendement du moteur

η_{moteur} à utiliser.

$$P_a = \frac{P_u}{\eta_m} \quad (57)$$

IV. 2. 2. 5. La puissance demandée :

La puissance demandée, elle est en fonction de la puissance absorbée par le moteur et du rendement de l'onduleur η_{ond} à utiliser.

$$P_{\text{dem}} = \frac{P_a}{\eta_{\text{ond}}} \quad (58)$$

IV. 2. 2. 6. La puissance du générateur photovoltaïque P_{GPV} :

Elle est en fonction de la puissance demandée et la somme des pertes de puissance attribuables à la température et à la poussière $\sum \text{pertes}$.

$$P_{\text{GPV}} = \frac{P_{\text{dem}}}{(1 - \sum \text{pertes})} \quad (59)$$

IV. 2. 2. 7. Le nombre de panneaux :

Le nombre de panneaux à installer est le rapport entre la puissance totale de générateur photovoltaïque P_{GPV} , avec la puissance maximal d'un seul panneau P_m .

$$N_P \geq \frac{P_{GPV}}{P_m} \quad (60)$$

IV.2. 2. 7. 1. Le nombre de panneaux en série :

C'est la division de la tension du bus continu V_{dc} en fonction du rapport cyclique α par la tension au point de puissance maximale du module photovoltaïque V_{mpp} .

$$N_{PS} \geq \frac{V_{dc}(1-\alpha)}{V_{mpp}} \quad (61)$$

IV. 2. 2. 7. 2. Le nombre de branches :

Le nombre de branches est le rapport entre le nombre panneaux totale avec le nombre de panneaux en série.

$$N_{branches} \geq \frac{N_P}{N_{PS}} \quad (62)$$

IV. 2. 3. Application numérique au dimensionnement :

Ce dimensionnement nous permettra de déduire le nombre total de panneaux à installer en série et en parallèle, pour obtenir la puissance nécessaire pour faire fonctionner notre MSAP.

- **La puissance hydraulique :**

$$P_h = \rho \cdot HMT \cdot g \cdot Q = 559W$$

Tel que :

$$Q = 0.0019 \text{ (m}^3/\text{s)}$$

$$HMT = 30 \text{ m}$$

- **La puissance électrique du moteur :**

Pour un rendement de la pompe $\eta_p = 55\%$ la puissance est

$$P_u = \frac{P_h}{\eta_p} = \frac{559}{0.55} = 1016W$$

Puisque les puissances des moteurs électriques sont normalisées, on prend un moteur de puissance de 1050W.

- **La puissance absorbée :**

Pour un rendement du moteur égal à 85%, et d'une puissance utile de 1050W, la puissance consommée par ce dernier sera égal :

$$P_a = \frac{P_u}{\eta_m} = \frac{1050}{0.85} = 1235W$$

▪ **La puissance à l'entrée de l'onduleur :**

Un onduleur qui a un rendement de 95% , et pour une puissance de 1235W, absorbée par le moteur, nous pouvons alors calculer la puissance à l'entrée de l'onduleur :

$$P_{dem} = \frac{P_a}{\eta_{ond}} = \frac{1235}{0.95} = 1300W$$

▪ **La puissance du générateur PV :**

On a une puissance à l'entrée de l'onduleur égale à 1300W. Et pour des pertes de puissance attribuables à la température et à la poussière, qui sont supposable égale à un cinquième de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque.

Donc nous pouvons calculer la puissance du générateur comme suivant :

$$P_{GPV} = \frac{P_{dem}}{(1-\sum pertes)} = \frac{1300}{(1-0.2)} = 1625W$$

▪ **Le nombre de panneaux :**

Puisque nous avons une puissance du générateur PV égale à 1625W, et pour une puissance maximale de 110V_C pour un panneau de type SIEMENS SM 110-24.

D'où le nombre de panneau :

$$N_p \geq \frac{P_{GPV}}{P_m} \geq \frac{1625}{110} = 15p$$

Le nombre de panneaux qui sera pris en considération sera 15panneaux.

▪ **Le nombre de panneaux en série :**

Le nombre de panneaux connectés en série, dépend du besoin en tension .La tension au point de puissance maximale du type du panneau choisit est N_{mpp}=35V. Alors pour une tension continue nominal de E= 525V, le nombre de panneaux connectés en série :

$$N_{PS} = \frac{E}{V_{mpp}} = \frac{525}{35} = 15p$$

Donc le nombre de panneaux en série est de 15.

▪ **Le nombre de branches :**

Le nombre de branches obtenues, est la division du nombre totale de panneau par le nombre qui est connectés en série :

$$N_{branches} = \frac{15}{15} = 1$$

Donc, pour alimenter notre moteur en puissance nécessaire, on aura besoin d'un générateur photovoltaïque qui possède 1 branche avec 15panneaux en série.

IV. 3. Simulation de système pompage photovoltaïque :

Après la modélisation de tous les paramètres de système de pompage photovoltaïque on a abouti au schéma bloque de la figure (IV.2) à l'aide de Matlab_Simulink.

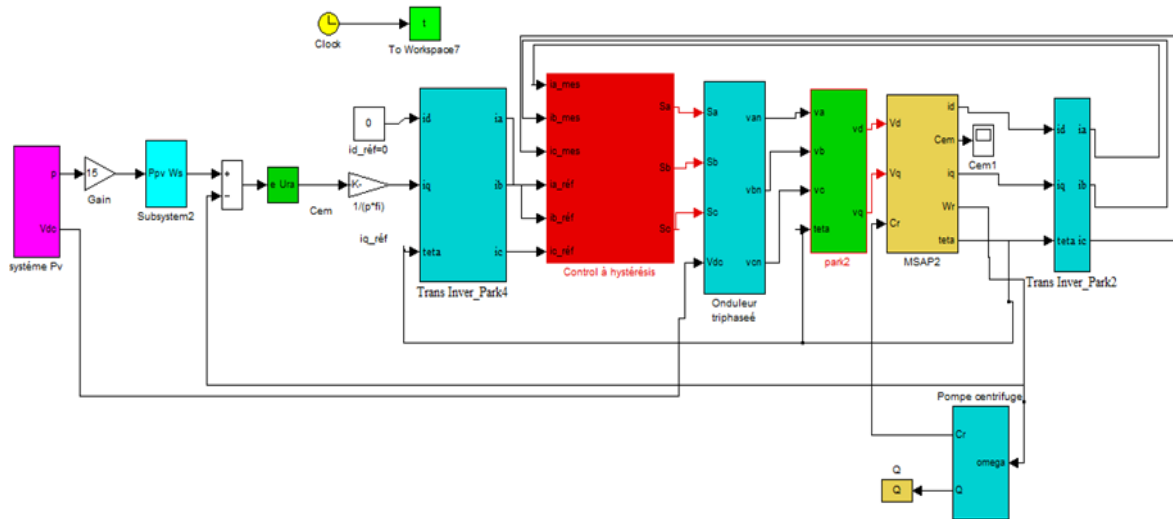


Figure IV.2 : Schéma bloc global de système pompage photovoltaïque

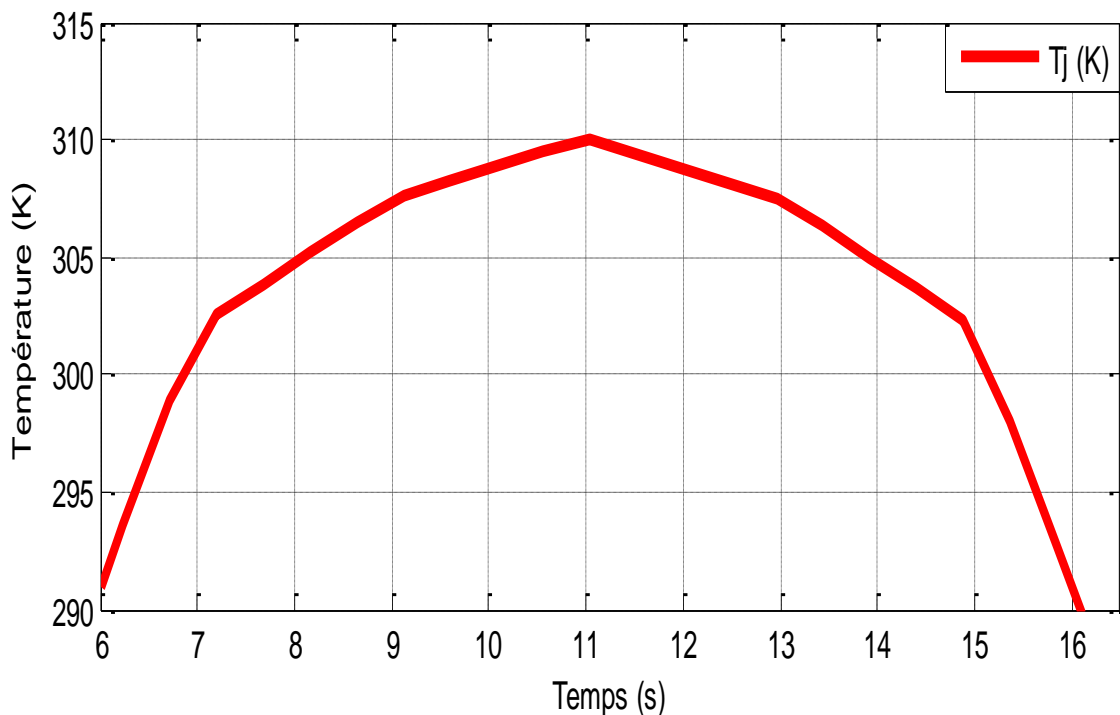


Figure VI.3 : L'évolution de la température de jonction en fonction du temps

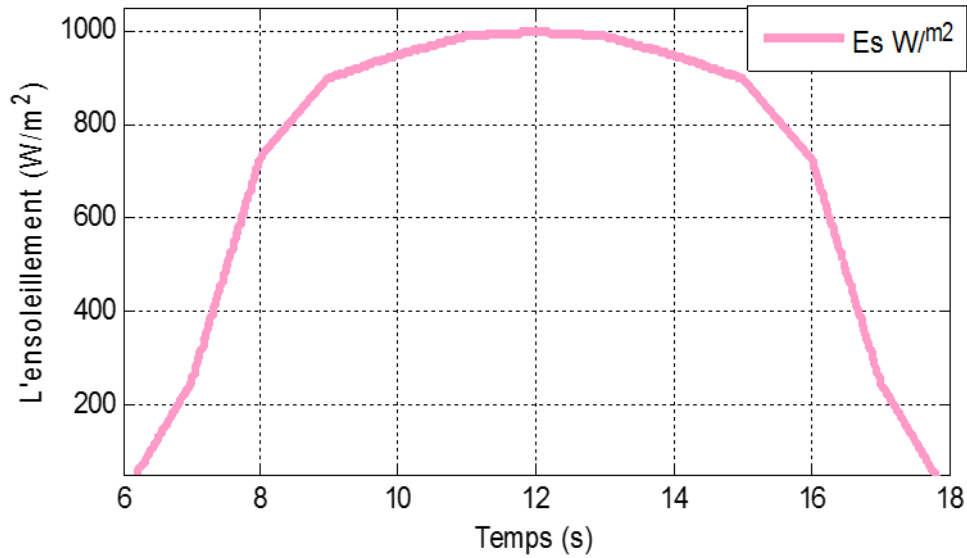


Figure IV.4 : L'évolution du L'enseillement en fonction du temps

Cette figure représente l'allure de L'enseillement pendant la journée, elle augmente progressivement jusqu'à atteindre son seuil au milieu de la journée, puis elle diminue.

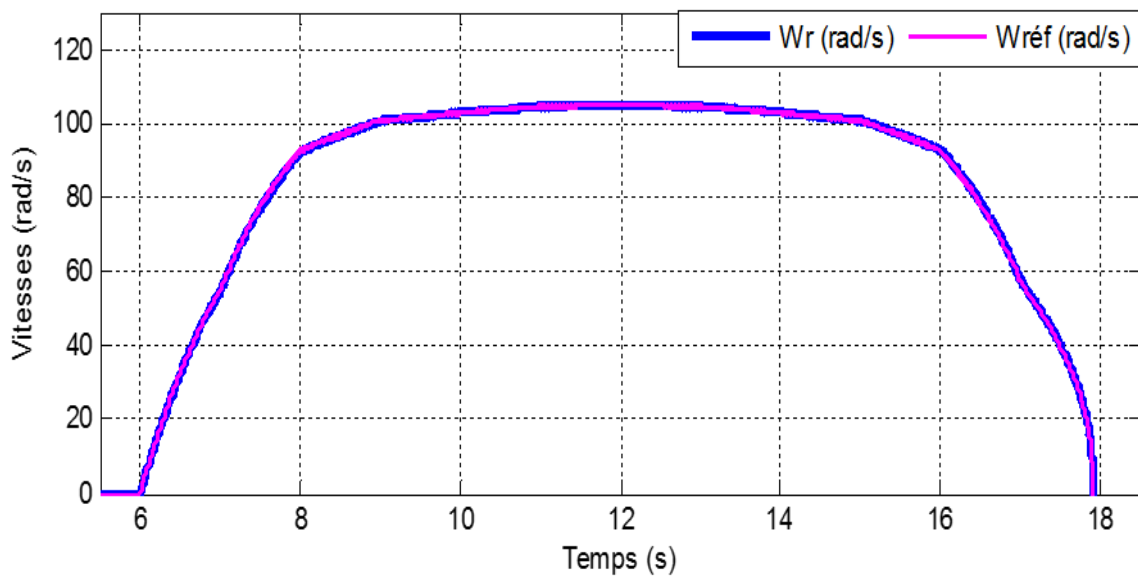


Figure IV.5 : L'évolution de la vitesse de rotation et de référencé en fonction du temps

D'après cette figure on voie bien que la vitesse de rotation suit la vitesse de référence et elle varie en fonction du temps. La caractéristique de la vitesse suit l'allure de l'enseillement pendant la journée.

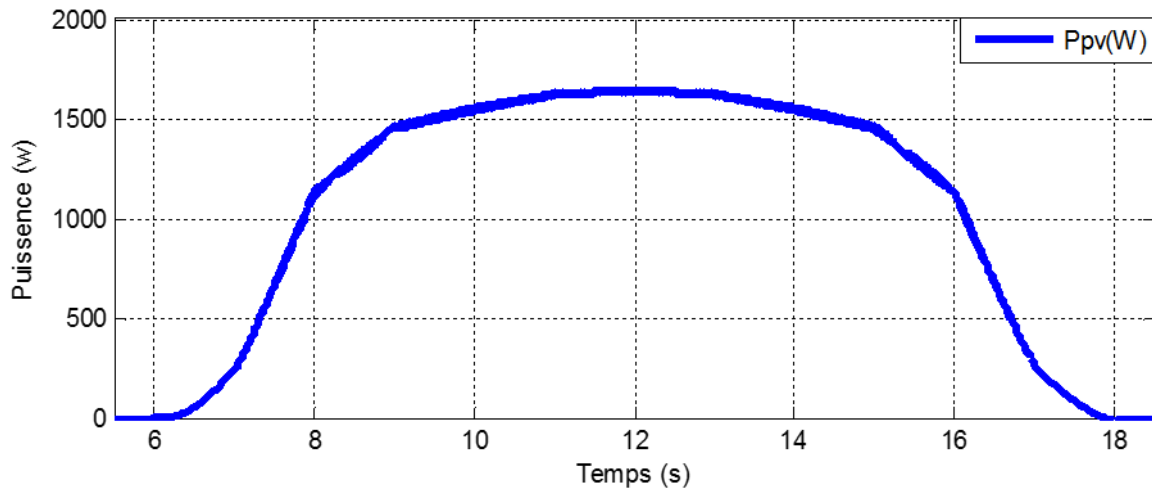


Figure IV.6: L'évolution de la puissance photovoltaïque en fonction du temps

On remarque dans cette figure que la puissance est proportionnelle directe à la variation de l'ensoleillement.

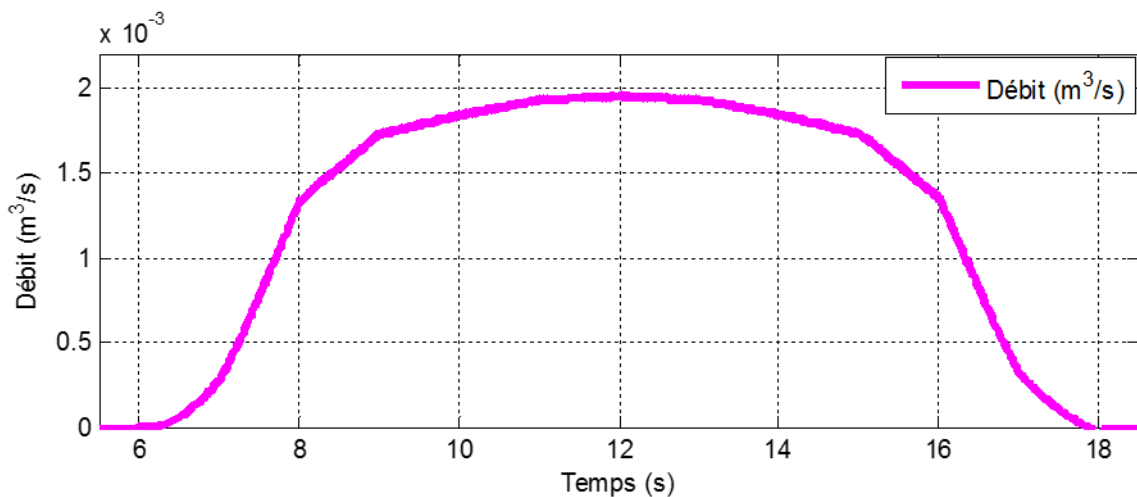


Figure IV.7 : L'évolution du débit en fonction du temps

On remarque dans cette figure que le débit est proportionnelle directe à la variation de de la puissance qui suit cette dernier la variation de l'ensoleillement.

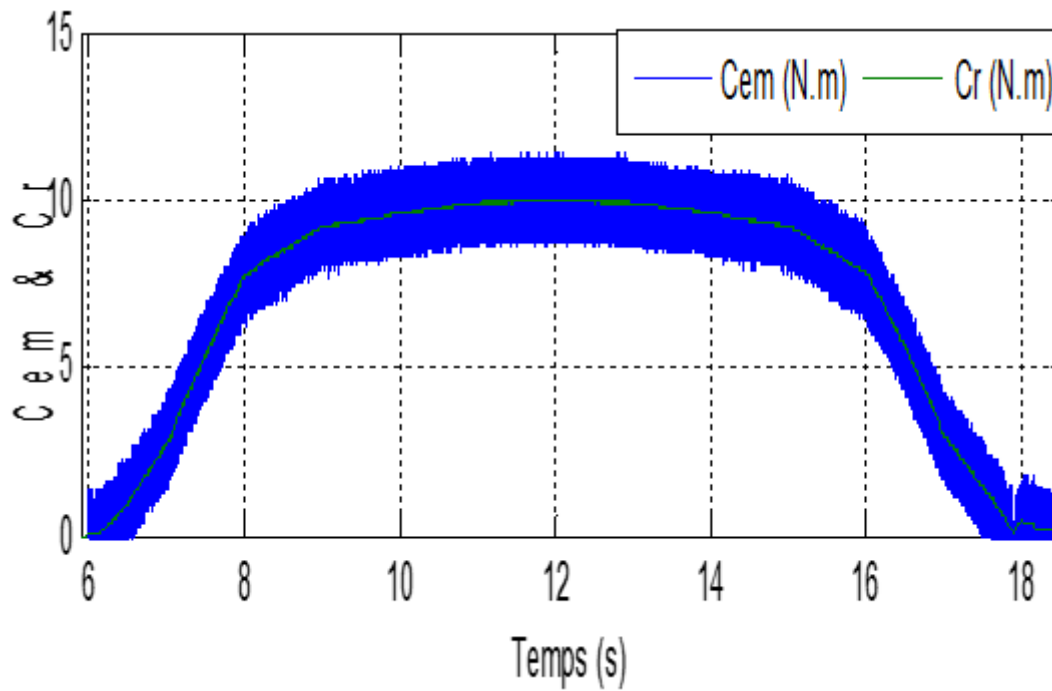


Figure IV.8 : L'évolution du couple électromagnétique et le couple résistant en fonction du temps

Le couple électromagnétique de la machine C_{em} suit la variation du couple résistant imposé par la pompe C_r à chaque diminution de l'ensoleillement et de la température.

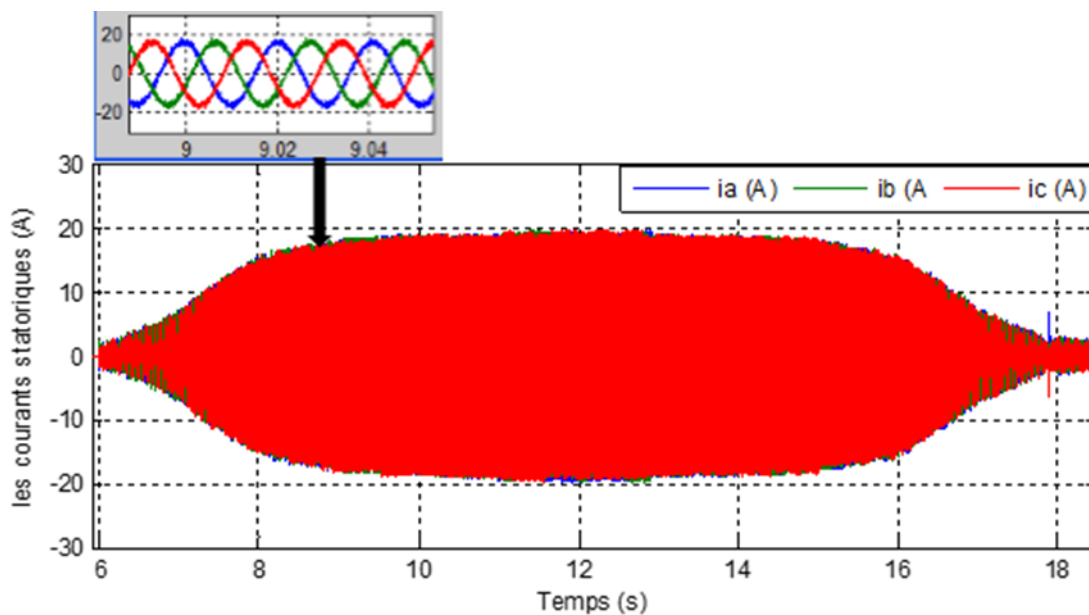


Figure IV.9 : L'évolution des courants statorique en fonction du temps

Cette figure représente la variation des courants statoriques en fonction du temps. La caractéristique de ces courants suit l'allure de l'ensoleillement pendant la journée.

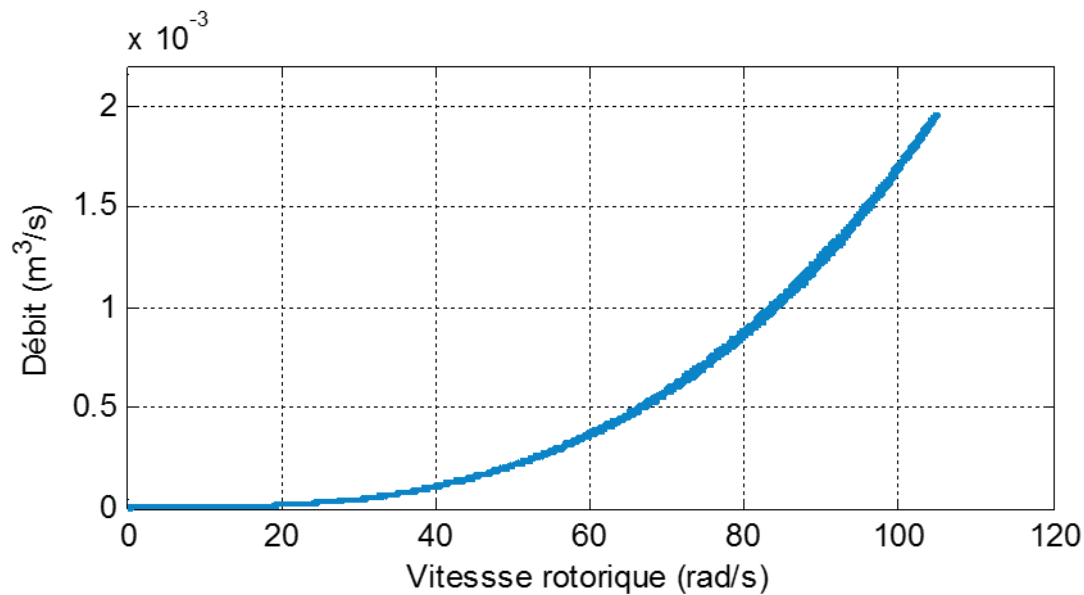


Figure IV.10 : L'évolution de débit en fonction de vitesse rotorique

Dans cette figure on remarque qu'à chaque fois que la vitesse de rotation augmente le débit augmente.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons dimensionné les différents composants du système de pompage photovoltaïque, à savoir la pompe centrifuge et son moteur synchrone à aimant permanent, l'onduleur de tension, et le générateur photovoltaïque. Nous avons aussi déterminé le nombre de modules nécessaires pour l'alimentation de notre système.

Les résultats des simulations montrent l'avantage de la commande en puissance d'un système de pompage photovoltaïque. La puissance délivrée par le générateur photovoltaïque varie en fonction de l'ensoleillement au niveau de la surface du panneau solaire, cette variation en puissance affecte sur la vitesse de rotation du moteur, ce qui conduit à une variation du débit en eau de la pompe.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le domaine des énergies renouvelables. Aujourd'hui les chercheurs travaillent sur ce domaine. Le système de pompage photovoltaïque à l'aide d'une machine synchrone à aimant permanent (MSAP) prend une place importante, c'est un sujet intéressant et récent. Ce système peut s'installer dans les sites isolés soit pour l'irrigation et/ou l'approvisionnement en eau.

Pour ce faire, d'abord nous avons présenté dans le premier chapitre un rappel théorique sur les différents systèmes de pompage photovoltaïque utilisé. Puis, nous avons décrit l'ensemble des éléments constituant du système choisi pour notre étude.

Dans le deuxième chapitre, nous avons passé à la modélisation de chaque composant du système photovoltaïque complet a été élaborée à partir de modèles de la littérature (champ PV et convertisseur DC-DC) ; cette modélisation est une étape essentielle qui permet d'introduire un certain nombre de modèles, puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres des constituants. On a utilisé des techniques d'intelligence artificielle dans le calcul de maximum de puissance MPPT, dans l'objectif d'exploiter le GPV à son maximum

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté la modélisation et la simulation de la machine synchrone à aimant permanent piloté par la commande vectorielle et alimenté par un onduleur triphasé à commande à hystérésis. Après nous avons présenté les résultats de simulation des paramètres (MSAP-Commande vectorielle) et leur interprétation qui montrent une bonne poursuite de la vitesse et du couple aux valeurs de références correspondantes.

Enfin dans le dernier chapitre nous avons modélisé la pompe centrifuge, puis nous avons dimensionné les différents composants de pompage photovoltaïque, qui représente d'une pompe centrifuge d'un moteur synchrone d'entraînement, l'onduleur triphasé et le générateur photovoltaïque. L'interprétation des résultats a montré que chaque variation des conditions météorologiques (température & l'ensoleillement), elle va affecter les réponses de la pompe (vitesse, couple, puissance, débit) car sont proportionnelles à la vitesse de rotation du moteur. Cette condition a une influence sur la puissance de GPV. La commande MPPT permet de trouver le point maximal de GPV.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : Mohamed Lakhdar LOUAZENE : «Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla». Mémoire de magister université EL HADJ LAKHDAR – BATNA, 2008.
- [2] : A. Moumi, N. Hamani , N. Moumi et A. Z. Mokhtari, « Estimation du rayonnement solaire par deux approches semi empiriques dans le site de biskra » , SIPE8, 11 et 12 Novembre 2006, Béchar, Algérie.
- [3] : Dada Moussa Abde Alkader Mr : Merimeche Mouad, « Optimisation de rendement énergétique d'un panneau solaire : (application au pompage solaire) ». Mémoire de master université de Jijel, 2008
- [4] : A. Betka « Optimisation d'un Système de Pompage Photovoltaïque au Fil du Soleil », Thèse de Magister, Université de Biskra.1997
- [5] : A.E Bouzidi et M Azizi : « Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour l'alimentation d'une ferme ». Mémoire de D.E.A., Djilali Liabés Sidi Bel Abbes, 2008.
- [6] : A. Hadj Arab, M. Benghanem et A. Gharbi : «Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque» ; Revue des Énergies Renouvelables. Vol.8, pp (19 – 26), 2005. (1141)
- [7] : cour « gisement solaire » monsieur idjdarene (2019-2020).
- [8] : Othman ben seddik.fathi djaloud. « Étude et optimisation d'un Sys PV ». Mémoire de master eth .université d'Ouargla 2012.
- [9] : R Alain : « Gisement solaire et transferts énergétiques ». Mémoire de D.E.A., Cergy-Pontoise, janvier 2011.
- [10] : SLAMA fateh. « Modélisation d'un Sys multi générateurs PV interconnectes au réseau électrique ».magister en eth.ufasetif.
- [11]: A. Maafi, « A survey on PV activities in Algeria ». Renewable Energy, 2000.
- [12] : M Addou et A Beddiaf : « Dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome pour l'alimentation d'une ferme ». Mémoire de D.E.A., Abou Bekr Belkaïd- Tlemcen, 2016.
- [13] : Cours Energie Solaire Photovoltaïque, Dr. BELAID LALOUNI Sofia, Année universitaire 2014/2015.
- [14] : Belhadji Mohamed : « modélisation d'un système de captage photovoltaïque. Autonome » Mémoire de magister : micro électrique ; carte université de Béchar institut des sciences exactes 2008.
- [15] : Akassewa Tchapo SINGO, « Système d'alimentation photovoltaïque avec .stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.

- [16] : Clarence SEMASSOU : « aide à la décision pour le choix de sites et systèmes énergétiques adaptés aux besoins du Benin ». Mémoire de d.e.a, l'université bordeaux 1, 2011.
- [17] : NAIM Hocine : « Etude de gestion d'une mini-centrale solaire et mise au point d'un dispositif automatique de mesures, contrôles et régulation de l'énergie électrique ». Mémoire de D.E.A Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, (2015-2016).
- [18] : abdeallah jelali, « interconnexion d'un système photovoltaïque sur le réseau électrique », mémoire fin de étude, l'université du Québec à Trois-Rivières, août 2012.
- [19] : cour systèmes de conversion de l'énergie photovoltaïque, Mme Rekioua, université de Bejaia (2020-2021).
- [20] : M. MEZZAI et S. MOULOUDI «Contribution à l'étude d'un système de pompage Photovoltaïque » mémoire de Master, université de Bejaia, Juin 2014.
- [21] : A. MIRICKI « Etude comparative de chaîne de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » thèse de doctorat de l'institut national de polytechnique de Toulouse France, 2005.
- [22] : DAOUD Amine « Contrôle de la Puissance d'un Générateur Photovoltaïque pour le Pompage Solaire». Thèse de doctorat Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2017.
- [23]: D. Turcotte, M. Ross, F. Sheriff « photovoltaic hybrid system sizing and simulation tools» horizon Canada, 2001.
- [24] : M.S. Aït Cheikh et al. « Maximum power point tracking using a fuzzy logic control schème », Laboratoire des Dispositifs de Communication et de Conversion Photovoltaïque Département d'Electronique, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, 2007.
- [25] : Anne labouret, Michel villos : « énergie solaire photovoltaïque ». 3eme Edition DANOD, 2007.
- [26]: M. BESSEM ABDELGHANI « Modélisation et simulation d'un pompage photovoltaïque » mémoire de Master, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA, 2018.
- [27]: T.FOMHERZ, F.PADINGER.D.GEBEYEHUR, GEBEYEHUR, C.BRABEC, J.C.Himmelen, saniciftei: << comparison of photovoltaic devices containing various blends of polymer and fullerene derivatives>> Solar energy materials and solar cells, vol.63, ISS.1, pp.61-68, 2000.
- [28] : GUY Seguer, Francis Labrique:<< les convertisseurs de l'électronique de puissance>>. Volume4. La conversion continu-alternatif. 1989.
- [29]: K. Djamila, O.fetta «Commande d'un Système de pompage Photovoltaïque» Mémoire d'Ingénieur d'Etat, UMMTO, 2009.

- [30]: T.Fogelman :<< système photovoltaïque pour les pays en développement >>.manuel d'installation et d'utilisation, Agence française pour la maîtrise de l'énergie, (AFME).
- [31]: B.Multon :<< les machines synchrones autopilotées >>notes de cours : Ecole normal supérieur de cochan, auteonne de bretagne, 2004.
- [32]: M.Oubidar, S.Bendaoud. « Machine Synchrones/Asynchrone », Projet de fin d'étude en ingénierie, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2010.
- [33]: H. Abdellaoui, « Etude expérimentale de la position rotorique d'un moteur synchrone à aimant permanent par variable électrique », Mémoire de Magister en électrotechnique université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.
- [34]: A F. Jawad, « Etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents», Thèse de Doctorat, Université de technologie de Belfort-Montbéliard, 05 décembre 2008.
- [35]: K. Azzedine, « Etude d'une commande non- linéaire adaptative d'une machine synchrone à aimants permanents », Ph, Québec, Canada, 2000.
- [36]: H. Chawab, «Stratégie de commande d'actionneurs synchrones à aimants permanents intégrant la sureté de fonctionnement ».Thèse de Doctorat, université de haute Alsace, 2004.
- [37]: R. Casimir, E. Bouteleux, H. Yahoui, G. Clerc, H. Henao, C. Delmotte, G. A. Capolino, G. Rostaing, J. P. Rognon, E. Foulon, L. Loran, H. Razik, G. Didier, G. Houdouin, G. Barakat, B. Dakyo, S. Bachir, S. Tnani, G. Champenois, J. C. Trigeassou, V. Devanneaux, B. Dagues, and J. Faucher, "Comparison of modelling methods and of diagnostic of asynchronous motor in case of defects," in *9th IEEE International Power Electronics Congress - CIEP 2004*, 2004, pp. 101-108. Jadwal.
- [38]: B. Alimarina, Z. Aoua : « Etude et conception d'une armoire de commande à démarreur électronique progressif –application à un groupe électropompe d'une station de
- [39]: D, Boukhers. "Optimisation D'un Système D'énergie Photovoltaïque Application Au Pompage". Mémoire Magister. Constantine : Université M'entourai, 2007.
- [40]: Jimmy Royer, thomas Djiako, Erico SCHILLER, Bokar Sada : «le pompage photovoltaïque». Manuel de cour à l'intention des ingénieurs et des techniciens.
- [41]: D.BOUKHERS « optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage », Mémoire de magister université de Constantine 2007.
- [42]: Cours Energie Solaire Photovoltaïque, Dr. BELAID LALOUNI Sofia, Année universitaire 2014/2015.
- [43]: Jimmy Royer, Thomas Djiako, Eric Schiller, Bocar Sada Sys « le pompage photovoltaïque, manuel de cours à l'intention des ingénieurs et techniciens » Institut de l'énergie des pays ayant en commun l'usage français, 1998.
- [44]: Ahmed O. Bagré. « Cours sur le pompage photovoltaïque et le dimensionnement de système PV ».

- [45]: meflah -aissa « modélisation et commande d'une chaîne de pompage photovoltaïque ».
- [46]: TEMACINI Djaber «Etude et dimensionnement d'une pompe à bout», Mémoire de master Université Mohamed khider – Biskra, 2019.
- [47]: Dj. Bellalia: «contribution à l'optimisation des systèmes de conversion d'énergie. Application au système photovoltaïque» : Mémoire de magistère université de Batna.
- [48]: L. Baghli, 'Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone', Institut Universitaire de Formation des Maîtres de Lorraine, Université Henri Poincaré, Nancy, 2005.
- [49]: Z. Laid « Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque –éolien hors réseau », Thèse de Doctorat de l'Université de Constantine, Algérie, 2010.
- [50]: S. Lalouni « Etude, commande et simulation d'une chaîne hybride (photovoltaïque éolienne) de production d'énergie électrique », Thèse de doctorat de l'université A.MIRA Bejaia, Algérie, 2009.
- [51] : R.Saisset, «Contribution à l'étude systématique de dispositifs énergétique à composants électrochimique. Formalise bond graph appliquée aux piles à combustible, accumulateurs lithium-ion», Thèses de Doctorat, Institut Nationale polytechnique de Toulouse, France, 2004.

Annexes

- **Les paramètres de générateur photovoltaïque :**

Les constructeurs des modules photovoltaïques fournissent les paramètres du module « I_{mpp} », « I_{CC} », « V_{mpp} », « V_{CO} » sous les conditions standards de fonctionnement, avec un éclairage de 1000 W/m^2 et une température de jonctions 25C° .

P_{PV}	Puissance photovoltaïque (W)	110 W
I_{mpp}	Courant maximum au PPM (A)	3.15 A
V_{mpp}	Tension maximum au PPM (V)	35 V
I_{CC}	Courant de court-circuit (A)	3.45 A
V_{CO}	Tension de circuit ouvert (V)	43.5 V
α_{sc}	Coefficient de la température de court-circuit (A/°K)	1.4 mA /°C
β_{oc}	Coefficient de tension (V/°K)	-152mV/°C
P_{mpp}	Puissance maximale (W)	110 W

- **Les paramètres de la machine à aimant permanent :**

Puissance nominal	$P_n = 1050 \text{ (W)}$
Vitesse nominal	$V_n = 105 \text{ (rad/s)}$
Résistance d'une phase statorique	$R_s = 1.4 \text{ (\Omega)}$
Le moment d'inertie	$J = 0.00176 \text{ (Kg/m}^2\text{)}$
Coefficient de frottement visqueux	$F = 0.0001 \text{ Nm/(rad/s)}$
Nombre de pole	$P = 3$
Inductance directe	$L_d = 0.0066 \text{ (H)}$
Inductance en quadrature	$L_q = 0.0066 \text{ (H)}$

- **Les paramètres de la pompe centrifuge :**

Puissance nominale	1050 (W)
débit	$0.0019(m^3/s)$
HMT	30 (m)
V_{dc}	525(V)